



DISERTASI - TE143599

# Identifikasi dan Peningkatan Nilai Stabilitas Tegangan pada Sistem Distribusi Tiga Fasa Menggunakan Metode Positive Sequence Catastrophe Theory

DIMAS FAJAR UMAN PUTRA  
NRP. 07111260010016

DOSEN PEMBIMBING  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D.  
Nip. 1949 07 15 1974 12 1001

Prof. DR. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.  
Nip. 1964 04 05 1990 02 1001

PROGRAM DOKTOR  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018



DISERTASI - TE143599

# **Voltage Stability Identification and Improvement of Three Phase Unbalanced Distribution System using Modified Positive Sequence Catastrophe Theory**

DIMAS FAJAR UMAN PUTRA  
NRP. 07111260010016

DOSEN PEMBIMBING  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D.  
Nip. 1949 07 15 1974 12 1001

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.  
Nip. 1964 04 05 1990 02 1001

PROGRAM DOKTOR  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018

## LEMBAR PENGESAHAN

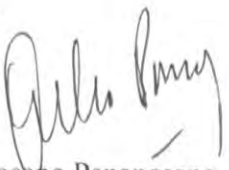
Disertasi disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
**Doktor (Dr.)**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Oleh:**

Dimas Fajar Uman P  
NRP : 07111260010016

Tanggal Ujian : 03 November 2017  
Periode Wisuda : Maret 2018

Disetujui Oleh:

- 
1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, Msc, PhD (Promotor)  
NIP. 194907151974121001
  2. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT (Co-Promotor)  
NIP. 1964041990021001
  3. Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa M. K., M.T. (Penguji)  
NIP. 196105071989031004
  4. Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, MSc (Penguji)  
NIP. 195004021979011001
  5. Dr. Rony Seto Wibowo, ST, MT (Penguji)  
NIP. 197411292000121001



Dekan Fakultas Teknologi Elektro

Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.  
NIP. 197002121995121001

**PERNYATAAN KEASLIAN  
DISERTASI**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Disertasi saya dengan judul:

**“Identifikasi dan Peningkatan Nilai Stabilitas Tegangan pada Sistem  
Distribusi Tiga Fasa Menggunakan Metode Positive Sequence Catastrophe  
Theory”**

adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2018



Dimas Fajar Uman Putra  
07111260010016

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan berkat, kasih dan anugerah-Nya semata, penulis dapat menyelesaikan disertasi dengan judul “Identifikasi dan Peningkatan Nilai Stabilitas Tegangan pada Sistem Distribusi Tiga Fasa Menggunakan Metode Positive Sequence Catastrophe Theory” dengan lancar, dan baik.

Adapun pembuatan disertasi ini ditujukan sebagai salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk menuntaskan studi sebagai mahasiswa S3 Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pada kesempatan ini, penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Untuk itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Allah SWT dan Nabi Muhammad SAW atas berkah dan rahmat serta karunia yang selalu dilimpahkan kepada penulis.
2. Bapak Prof. Ontoseno Penangsang dan Prof. Adi Soeprijanto Promotor dan Co Promotor, terima kasih atas segala bimbingan, wejangan, perhatian, kesabaran dan arahan selama pengerjaan Disertasi.
3. Kedua orang tua baik kandung maupun mertua dari penulis yang senantiasa tak pernah lelah memberikan dukungan dari segi apapun kepada penulis dan tak henti-hentinya berdoa demi keberhasilan penulis.
4. Istri saya tercinta Ririn Harwati dan kedua anak saya tercinta Tsabita Khanza Adisti Uman dan Faeyza Dirga Abbad Uman, terima kasih atas segala kasih sayang, perhatian, dan dukungan selama pengerjaan Disertasi.
5. Bapak dan Ibu dosen pengajar Teknik Elektro ITS sekaligus rekan kerja yang telah banyak memberikan materi, bersedia berbagi ilmu pengetahuan dan pengalaman berguna kepada penulis. Terimakasih Bapak, Ibu, jasa kalian akan selalu penulis kenang.
6. Sahabat-sahabat saya E-46, asisten Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik angkatan 2009 sampai angkatan 2015 yang selalu membantu penulis saat kesusahan.
7. Teman-teman permainan DOTA 2 yaitu: Aji Akbar, Yuli Prasetyo, Vicky Andria, Basuki, Indro, Khakim, Novian, Wisky, Cak Enno dll yang membantu penulis menghilangkan rasa jenuh dan kepenatan dengan satu game.
8. Seluruh teman-teman Teknik Elektro ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah memberi semangat dan menulis cerita dengan penulis selama penulis disini.

Akhirnya, penulis menyadari bahwa dalam penulisan Disertasi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka oleh saran dan masukan yang bersifat membangun agar penulis dapat menghasilkan karya yang lebih baik di masa yang akan datang.

Surabaya, Januari 2018

Penulis

*Halaman ini Sengaja Dikosongkan*

## ABSTRAK

### **Identifikasi dan Peningkatan Nilai Stabilitas Tegangan pada Sistem Distribusi Tiga Fasa Menggunakan Metode *Positive Sequence Catastrophe Theory***

Oleh

**Dimas Fajar Uman Putra**  
**NRP : 07111260010016**

Pembimbing : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D

Ko Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T

Permasalahan stabilitas tegangan pada sistem distribusi ditandai dengan penurunan tegangan secara cepat yang diakibatkan oleh pembebanan sistem yang berlebih. Penurunan nilai stabilitas tegangan pada sistem distribusi akan mengakibatkan jumlah beban yang dapat tersuplai menjadi terbatas. Terlebih lagi sistem distribusi yang terbuhung langsung ke beban mengakibatkan permasalahan stabilitas tegangan pada sistem distribusi menjadi sebuah permasalahan serius. Dampak terburuk dari permasalahan stabilitas tegangan adalah menyebabkan sistem menjadi padam total. Dengan melihat nilai indeks stabilitas tegangan (VSI), menggunakan metode *L-index* atau *catastrophe theory* kondisi stabilitas tegangan pada sebuah sistem distribusi dapat diketahui. Namun, teknik-teknik tersebut menggunakan pendekatan sistem distribusi yang dianggap seimbang.

Untuk itu didalam disertasi ini dikembangkan sebuah metode untuk mencari nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi tiga fasa tak seimbang. Metode ini merupakan pengembangan konsep *sequence component*. *Sequence component* digunakan untuk menyederhanakan analisis sistem tenaga listrik yang tidak seimbang menjadi komponen urutan positif, negatif dan nol. Nilai *sequence component* inilah yang akan digunakan pada metode *Catastrophe Theory* untuk menentukan nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi tiga fasa tidak seimbang. Metode ini bernama metode *Positive Sequence Based Catastrophe Theory Voltage Stability Index* (P.S Cat VSI). Kemudian hasil metode ini dibandingkan dengan nilai urutan indeks stabilitas tegangan hasil dari nilai *positive sequence Voltage Ranking Index* (VRI) dan *Voltage Stability Index* (VSI's) tiga fasa untuk validasi metode usulan, sedangkan *plant* yang digunakan adalah IEEE radial 15 bus dan sistem distribusi surabaya utara 20 kV. Nilai indeks stabilitas tegangan yang diperoleh dari metode usulan akan menjadi dasar untuk melakukan peningkatan nilai stabilitas tegangan.

Pada akhir penelitian ini diperoleh mekanisme untuk mengatasi permasalahan stabilitas tegangan yang dapat diimplementasikan kedalam sebuah sistem distribusi sehingga diperoleh sebuah otomatisasi sistem distribusi (*distribution automation system*) pada sistem distribusi tidak seimbang.

**Kata kunci:** *Network Topology power flow, Positive Sequence Catastrophe Theory, Distribution Automation Systems, Pelepasan Beban, Rekonfigurasi Jaringan, Penempatan Kapasitor.*

*Halaman ini Sengaja Dikosongkan*



## ABSTRACT

### **Voltage Stability Identification and Improvement for Three Phase Distribution Systems Using Positive Sequence Catastrophe Theory**

By:

**Dimas Fajar Uman Putra**  
**NRP : 07111260010016**

Promotor : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D  
Co-Promotor : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T

Voltage stability problems in the distribution system is characterized by rapid voltage drop caused by excessive loading system. Impairment of voltage stability in the distribution system will result in the amount of load that can be supplied is limited. Moreover, the distribution system directly connected to the load lead the voltage stability problems in the distribution system becomes a serious problem. The worst effects of voltage stability problem is causing the system blackout. By looking at the voltage stability index (VSI) value, L-index and catastrophe theory, the voltage stability condition in a distribution system can be observed. However, these techniques use a balanced approach to the distribution system.

In this dissertation developed a new method to obtain the value of voltage stability index in three-phase unbalanced distribution system. The proposed method is a development of the symmetrical components. Symmetrical components is used to simplify analysis of unbalanced distribution system by changing the phase value into positive, negative and zero sequences. The value of the sequence will be used in Catastrophe Theory method to determine the value of voltage stability index on three phase unbalanced distribution system. This method called positive sequence based catastrophe theory voltage stability index (P.S Cat VSI). Then the results of the proposed method will be compared with the value of the positive sequence voltage ranking and VSIs three phase to validate the proposed method, while the plant used are IEEE 15 bus radial distribution systems and Surabaya Utara 20 kV distribution systems. Voltage stability index values obtained from the proposed method used as a reference to improve voltage stability index values in unbalanced distribution system.

In this dissertation obtained a mechanism to prevent voltage stability problems that can be implemented on the distribution automation system for unbalanced distribution systems.

**Keywords:** *Network Topology power flow, Positive Sequence Catastrophe Theory, Distribution Automation Systems, Load Shedding, Reconfiguration, Capacitor Placement.*

*Halaman ini Sengaja Dikosongkan*

# DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	ii
<b>PENGESAHAN KEASLIAN DISERTASI</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	iv
<b>ABSTRAK</b> .....	vi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	x
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xv
<b>DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL</b> .....	xvi
 <b>Bab I Pendahuluan</b> .....	 1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian.....	4
1.4. Batasan Penelitian .....	4
1.5. Kontribusi / Signifikansi Penelitian .....	5
 <b>Bab II Kajian Pustaka dan Dasar Teori</b> .....	 9
2.1. Sistem Distribusi Tenaga Listrik.....	9
2.2. Analisis Aliran Daya Sistem Distribusi Radial .....	9
2.2.1 Metode <i>Forward-Backward Sweep Power Flow</i> untuk Sistem Distribusi Radial Satu Fasa (Seimbang) .....	10
2.2.2 Metode <i>Network Topology Power Flow</i> untuk Sistem Distribusi Radial Satu Fasa (Seimbang) .....	13
2.2.3 <i>Network Topology Power Flow</i> pada Sistem Distribusi Tiga Fasa .....	17
2.3. Stabilitas Tegangan .....	17
2.4. Stabilitas Tegangan pada Sistem Distribusi Seimbang .....	18
2.4.1 Voltage Stability Index (VSI) .....	20
2.4.2 Catastrophe Theory VSI .....	21

2.5. <i>Sequence Component</i> .....	22
2.6. <i>Extreme Learning Machine</i> .....	26
2.7. Rekonfigurasi Jaringan .....	28
2.8. Penambahan Kapasitor.....	30
2.9. <i>BinaryFirefly Algorithm</i> .....	32
2.9.1 Keatraktifan <i>Firefly</i> .....	33
2.9.2 Jarak Antar <i>Firefly</i> .....	33
2.9.3 Pergerakan <i>Firefly</i> .....	33
<b>Bab III Metode Penelitian</b> .....	35
3.1. Metodologi yang Diusulkan .....	37
3.1.1 <i>Positive Sequence Catastrophe Theory VSI</i> .....	38
3.1.2 <i>Extreme Learning Machine Based Catastrophe Theory VSI</i> .....	39
3.2. Peningkatan Nilai Indeks Stabilitas Tegangan .....	39
3.2.1 Peningkatan Nilai Indeks Stabilitas Tegangan dengan Pelepasan Beban .....	40
3.2.2 Rekonfigurasi Jaringan.....	42
3.2.3 Penambahan Kapasitor.....	43
3.3. Penambahan Kapasitor.....	44
3.4. Penerapan <i>Binary Firefly Algorithm</i> .....	45
3.5. Fungsi Objektif .....	47
3.6. Batasan – batasan ( <i>Constraint</i> ) .....	48
<b>Bab IV Hasil Simulasi dan Analisis Data</b> .....	49
4.1. Plant yang Digunakan .....	49
4.1.1 Plant IEEE 15 Bus.....	49
4.1.2 Plant Surabaya Utara 20 kV Penyulang Basuki Rahmat .....	51
4.1.3 Plant IEEE 33 Bus .....	54
4.2. Validasi Metode .....	56
4.3. Identifikasi Indeks Stabilitas Tegangan Menggunakan P.S Catastrophe Theory VSI .....	57
4.4. Identifikasi Indeks Stabilitas Tegangan Menggunakan	

ELM Based P.S Catastrophe Theory VSI .....	61
4.5. Peningkatan Nilai Indeks Stabilitas Tegangan .....	64
4.5.1 Peningkatan Nilai Indeks Stabilitas Tegangan dengan Rekonfigurasi Jaringan.....	67
4.5.2 Peningkatan Nilai Indeks Stabilitas Tegangan dengan Pemasangan Kapasitor .....	71
4.5.3 Peningkatan Nilai Indeks Stabilitas Tegangan dengan Rekonfigurasi Jaringan dan Pemasangan Kapasitor .....	74
<b>Bab V Kesimpulan dan Saran.....</b>	<b>79</b>
5.1. Kesimpulan.....	79
5.2. Saran.....	80
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>81</b>
<b>DAFTAR RIWAYAT HIDUP</b>	

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1	Posisi penelitian stabilitas tegangan..... 5
Gambar 1.2	Fishbone Penelitian ..... 8
Gambar 2.1	Contoh Rangkaian Analisis Aliran Daya <i>forward-backward</i> ..... 11
Gambar 2.2	Single Line Diagram Contoh Metode Network Topology..... 15
Gambar 2.3	Sebuah Sistem Distribusi Radial ..... 20
Gambar 2.4	Komponen simetris tegangan dari sistem tiga fasa tidak seimbang, (a) urutan positif, (b) urutan negatif, (c) urutan nol ..... 23
Gambar 2.5	Tegangan sistem sebagai penjumlahan dari komponen simetris ..... 24
Gambar 2.6	Struktur ELM ..... 28
Gambar 2.7	Pengaruh pemasangan kapasitor pada saluran distribusi ..... 30
Gambar 2.8	Segitiga arus ..... 30
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian ..... 35
Gambar 3.2	Diagram alir rekonfigurasi jaringan dan penambahan kapasitor 40
Gambar 3.3	Dasar pembuatan matrik tiga dimensi..... 41
Gambar 3.4	Matrik tiga dimensi kombinasi rekonfigurasi dan kapasitor..... 42
Gambar 3.5	Contoh sistem IEEE 33 bus dengan loop numbers ..... 42
Gambar 3.6	<i>Flowchart</i> penerapan <i>binary firefly algorithm</i> ..... 46
Gambar 4.1	SLD Sistem IEEE 15 Bus ..... 50
Gambar 4.2	SLD Sistem Distribusi Surabaya Utara 20 kV Penyulang Basuki Rahmat ..... 53
Gambar 4.3	SLD Sistem IEEE 33 Bus ..... 56
Gambar 4.4	Nilai Indeks Stabilitas Tegangan Pada Sistem Tiga Fasa Tidak Seimbang untuk Metode P.S. Cat VSI (Metode Yang Diusulkan)..... 58
Gambar 4.5	Perbandingan Nilai Indeks Stabilitas Tegangan pada Sistem Tiga Fasa Tidak Seimbang untuk Ketiga Metode..... 58
Gambar 4.6	Perbandingan Waktu Eksekusi pada Ketiga Metode ..... 59
Gambar 4.7	Perbandingan Hasil Training NN dengan

	Data Perhitungan Sesungguhnya .....	61
Gambar 4.8	Grafik Performansi Training NN.....	61
Gambar 4.9	Perbandingan Hasil Training ELM dengan Data Perhitungan Sesungguhnya .....	62
Gambar 4.10	Perbandingan Hasil Testing NN dengan Data Perhitungan Sesungguhnya .....	63
Gambar 4.11	Grafik Performansi Testing NN .....	63
Gambar 4.12	Perbandingan Hasil Testing ELM dengan Data Perhitungan Sesungguhnya .....	64
Gambar 4.13	<i>Single Line Diagram</i> Jaringan Distribusi 33-Bus Kondisi Awal.....	65
Gambar 4.14	Profil Tegangan Sistem IEEE 33-Bus Kondisi Awal.....	65
Gambar 4.15	<i>Single Line Diagram</i> Jaringan Distribusi 33-Bus Setelah Rekonfigurasi.....	68
Gambar 4.16	Grafik Konvergensi BPSO untuk Rekonfigurasi Jaringan .....	69
Gambar 4.17	Profil Tegangan Sistem IEEE 33-Bus Setelah Rekonfigurasi.....	69
Gambar 4.18	<i>Single Line Diagram</i> IEEE 33 bus Setelah pemasangan kapasitor .....	72
Gambar 4.19	Profil tegangan IEEE 33 bus setelah pemasangan kapasitor .....	72
Gambar 4.20	Grafik konvergensi simulasi BFA .....	75

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Kelompok Kombinasi <i>Switch OFF</i> .....	43
Tabel 3.2 Data <i>Binary</i> Untuk Lokasi Penempatan Kapasitor.....	43
Tabel 3.3 Data <i>Binary</i> Untuk Kapasitas Kapasitor .....	44
Tabel 4.1 Data Saluran pada sistem IEEE 15 Bus yang dimodifikasi.....	49
Tabel 4.2 Data Beban pada sistem IEEE 15 Bus yang dimodifikasi.....	50
Tabel 4.3 Kondisi Pembebanan pada Penyulang Basuki Rahmat.....	51
Tabel 4.4 Data Impedansi Penyulang Basuki Rahmat .....	52
Tabel 4.5 Data Beban pada Sistem IEEE 33 Bus yang dimodifikasi.....	54
Tabel 4.6 Data Impedansi pada Sistem IEEE 33 Bus yang dimodifikasi.....	55
Tabel 4.7 Hasil Simulasi pada Sistem IEEE 15 Bus yang dimodifikasi .....	57
Tabel 4.8 Rekap Nilai Indeks Stabilitas Tegangan Berdasar <i>Negative Sequence</i> pada Penyulang Basuki Rahmat.....	66
Tabel 4.9 Hasil Aliran Daya IEEE 33 Bus Kondisi Awal.....	66
Tabel 4.10 Kondisi Tegangan Sebelum dan Setelah Rekonfigurasi Jaringan .....	70
Tabel 4.11 Kondisi Penyulang IEEE 33 Bus Sebelum dan Setelah Rekonfigurasi Jaringan .....	71
Tabel 4.12 Hasil Aliran Daya IEEE 33 Bus Setelah Pemasangan Kapasitor .....	73
Tabel 4.13 Hasil Pemasangan Kapasitor Menggunakan Metode BFA.....	74
Tabel 4.14 Rekapitulasi nilai tegangan dan indek stabilitas tegangan hasil simulasi BFA.....	75
Tabel 4.15 Perbandingan nilai indek stabilitas tegangan untuk kondisi normal, rekonfigurasi jaringan, pemasangan kapasitor dan rekonfigurasi plus pemasangan kapasitor.....	76
Tabel 4.16 Perbandingan Hasil pemasangan kapasitor biasa dan dengan rekonfigurasi .....	77



## Daftar Notasi dan Simbol

$Z_{12}$	Impedansi dari bus-1 ke bus-2
$Z_{23}$	Impedansi dari bus-2 ke bus-3
$\Delta V^k$	deviasi tegangan bus ke- $k$
$V^{k+1}$	tegangan bus ke- $k+1$
$[K]$	Matriks yang berisi hubungan antar titik cabang
$[K]^T$	<i>Transpose</i> dari matriks yang berisi hubungan antar titik cabang
$a$	besaran dengan magnitude $1\angle 120^\circ$
$A_t$	nilai sebenarnya
$B_k$	arus cabang di setiap saluran
$DLF$	hasil perkalian antara BCBV dengan BIBC
$ZF_{BR}$	Matriks yang berisikan impedansi ( <i>Full Branch Matrix</i> )
$F_t$	hasil peramalan
$I_{bus(i)}^{(k)}$	nilai arus oleh cabang $k$ dari bus $i$
$ I_{(i)}^{(k+1)} $	nilai arus oleh cabang $i$ untuk iterasi ke- $k+1$
$ I_{(i)}^{(k)} $	nilai arus oleh cabang $i$ untuk iterasi ke- $k$
$\Delta V^k$	selisih tegangan pada iterasi ke- $i$
$V_{bus(i)}^{(k)}$	nilai besaran tegangan oleh cabang $k$ pada bus $i$
$jQ_{(i)}^{sh}$	aliran daya reaktif shunt dari node $i$
$jX_k$	reaktansi dari saluran $k$
$n$	jumlah bus
$P$	daya aktif
$P_{(i)}^{sh}$	aliran daya aktif shunt dari node $i$
$P_{pos}$	urutan positif aliran daya aktif
$Q$	daya reaktif
$Q_{pos}$	urutan positif aliran daya reaktif
$R$	resistansi

$R_k$	resistansi pada saluran $k$
$R_{pos_k}$	urutan positif resistansi dari saluran $k$
$V_{si}$	metode penentuan indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi radial
$S$	aliran daya semu total 3 fasa
$SI$	voltage stability index (VSI) setiap bus
$SI_{pos}(i)$	urutan positif VSI pada bus $i$ untuk sistem distribusi radial tidak seimbang
$V^*$	Besaran tegangan konjugasi
$V_{bus(i)}^{(k)}$	nilai besaran tegangan oleh cabang $k$ pada bus $i$
$V_{pos}$	urutan positif besaran tegangan
$V_{bus\_noload}$	besaran tegangan tanpa beban di setiap bus
$VSI$	Voltage Stability Index
$VRI$	Voltage Ranking Index
$VSI_{cat}$	voltage stability index (VSI) dengan menerapkan teori catastrophe
$VSI^+_{cat}$	urutan positif VSI dengan menerapkan teori catastrophe
$X$	reaktansi
$X_{pos_k}$	reaktansi urutan positif dari saluran $k$
$Z_k$	impedansi dari saluran $k$
$V_s$	Tegangan Sumber
$V_a$	Tegangan fasa a
$V_b$	Tegangan fasa b
$V_c$	Tegangan fasa c
$V_{a1}$	Komponen urutan positif untuk tegangan fasa a
$V_{a2}$	Komponen urutan negatif untuk tegangan fasa a
$V_{a0}$	Komponen urutan nol untuk tegangan fasa a
$V_{b1}$	Komponen urutan positif untuk tegangan fasa b
$V_{b2}$	Komponen urutan negatif untuk tegangan fasa b
$V_{b0}$	Komponen urutan nol untuk tegangan fasa b
$V_{c1}$	Komponen urutan positif untuk tegangan fasa c

$V_{c2}$	Komponen urutan negatif untuk tegangan fasa c
$V_{c0}$	Komponen urutan nol untuk tegangan fasa c
$I_{a1}$	Komponen urutan positif untuk arus fasa a
$I_{a2}$	Komponen urutan negatif untuk arus fasa a
$I_{b0}$	Komponen urutan nol untuk arus fasa a
$I_{b1}$	Komponen urutan positif untuk arus fasa b
$I_{b2}$	Komponen urutan negatif untuk arus fasa b
$I_{c0}$	Komponen urutan nol untuk arus fasa b
$I_{c1}$	Komponen urutan positif untuk arus fasa c
$I_{c2}$	Komponen urutan negatif untuk arus fasa c
$I_n$	Arus netral
$J$	jumlah <i>nodes</i>
$w_i$	vektor pembobot ke- $i$
$\beta_i$	Bias ke- $i$
$b_i$	<i>Threshold</i> ke- $i$
$x_i$	Posisi kunang-kunang
$y_i$	<i>Output layer</i>
$P_{loss}$	Total <i>losses</i> sebuah sistem
$r_i$	Resistansi bus ke- $i$
$r_{ij}$	Jarak antara kunang-kunang $i$ dan $j$
$\lambda_V$	Penalti faktor
$S_{CV}$	Jumlah dari tegangan yang melanggar batasan tegangan
$\sum_{q \in S_B} Q_q^C$	Jumlah total daya reaktif pada kapasitor
$\sum_{q \in S_B} Q_q^L$	Jumlah total daya reaktif semua beban
LR(m)	Pengurangan losses di bus m
LR <sub>min</sub>	Pengurangan losses terkecil
LR <sub>max</sub>	Pengurangan losses terbesar
$Cat\_VSI$	Nilai indeks stabilitas tegangan berdasarkan metode <i>Catastrophe Theory</i>
$I_r$	Arus reaktif
PLI	Nilai indeks <i>losses</i> dari sebuah saluran

*Halaman ini Sengaja Dikosongkan*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Permasalahan stabilitas tegangan merupakan salah satu permasalahan penting dalam sebuah sistem tenaga listrik. Permasalahan ini diakibatkan oleh pembebanan yang berlebih secara terus-menerus. Pada sistem transmisi, permasalahan ini sudah cukup lama diketahui dan sudah banyak pula metode-metode yang telah dikembangkan untuk mengetahui permasalahan stabilitas tegangan [1].

Permasalahan stabilitas tegangan pada sistem distribusi memiliki tingkat kompleksitas yang lebih rumit jika dibandingkan dengan sistem transmisi, hal ini menyebabkan metode penentuan nilai stabilitas tegangan yang telah dikembangkan pada sistem transmisi tidak dapat digunakan untuk penyelesaian permasalahan pada sistem distribusi. Metode penentuan nilai stabilitas tegangan pada sistem distribusi dengan memodelkan sistem distribusi radial menjadi sebuah sistem *single line equivalent* dikemukakan oleh Jasmon dan Lee [2] dan Gubina dan Strmchnik [3]. Akan tetapi kedua metode ini hanya dapat digunakan untuk perubahan beban yang kecil dan tidak dapat digunakan untuk melihat nilai stabilitas tegangan pada tiap bus. Kemudian muncul metode *Voltage Stability Index* (VSI) yang dapat digunakan untuk melihat indeks stabilitas pada setiap bus yang dikemukakan oleh M. Chakravorty dan D. Das [4]. Setelah teori yang dikembangkan pada [4], muncul metode-metode baru untuk menyelesaikan permasalahan stabilitas tegangan untuk sistem distribusi radial antara lain *Continuation Power Flow* untuk sistem distribusi [5], *P-V-Q curve* [6], *Voltage Stability Index* (VSI's) [7] dan metode terbaru adalah *Catastrophe Theory* [8]. Dari nilai indeks stabilitas tegangan ini diperoleh urutan bus yang merepresentasikan urutan bus terlemah sampai yang terkuat. Bus terlemah adalah bus yang mengalami fluktuasi tegangan terbesar di dalam sebuah sistem distribusi jika terjadi perubahan beban.

Teori-teori yang telah dikembangkan diatas terbatas hanya untuk sistem distribusi radial yang dianggap seimbang. Pada tahun 2005 di kenalkan metode *Continuation Three-Phase Power Flow* [9] yang dapat digunakan untuk

menentukan nilai stabilitas tegangan pada sistem distribusi yang tidak seimbang dan hingga saat ini hanya metode *positive sequence voltage urutan index (positive sequence VRI)* [10] dan *backward-forward sweep load-flow analysis method with secant predictor* [11] yang berhasil dikembangkan untuk menyelesaikan permasalahan stabilitas tegangan pada sistem distribusi yang tidak seimbang.

Metode penentuan VSI tiga fasa pada [9] dan [10] menggunakan komponen *positive sequence* akibat kondisi yang tidak seimbang. Dengan konsep tersebut, pada disertasi ini digunakan konsep perhitungan nilai VSI tiga fasa dengan menggunakan *positive sequence VRI* di implementasikan untuk mencari nilai VSI dengan menggunakan metode *Catastrophe theory*. Kemudian hasil dari simulasi dibandingkan dengan nilai urutan VSI hasil dari *positive sequence VRI* yang digunakan untuk validasi metode usulan. Nilai indeks stabilitas tegangan yang diperoleh dari metode usulan menjadi dasar untuk melakukan upaya peningkatan nilai indeks stabilitas tegangan pada sebuah sistem distribusi yang tidak seimbang.

Adapun contoh upaya untuk meningkatkan nilai stabilitas tegangan antara lain adalah pelepasan beban rekonfigurasi jaringan, pelepasan beban dan penambahan kapasitor. Rekonfigurasi jaringan dilakukan dengan mengatur status kerja dari *switch* saluran untuk mengubah konfigurasi jaringan sehingga didapatkan perubahan nilai arah aliran daya. Pelepasan beban merupakan mekanisme pelepasan *switch* beban untuk mengurangi jumlah beban pada sistem sehingga berdampak pada kenaikan nilai indeks stabilitas tegangan [15-19]. Sedangkan rekonfigurasi dilakukan dengan mengatur status kerja dari *switch* untuk mengubah konfigurasi jaring. Teknik rekonfigurasi untuk sistem distribusi seimbang maupun yang tidak seimbang telah dikembangkan pada [12-14] untuk menaikkan nilai indeks stabilitas tegangan. Sedangkan penambahan kapasitor merupakan salah satu usaha yang dapat dilakukan untuk mengkompensasi daya reaktif sehingga nilai rugi-rugi jaringan turun dan juga dapat mengakibatkan nilai stabilitas tegangan naik [20-23].

Sehingga pada akhir penelitian ini diperoleh mekanisme untuk mengatasi permasalahan stabilitas tegangan yang dapat diimplementasikan kedalam sebuah sistem distribusi sehingga diperoleh sebuah otomasi sistem distribusi (*distribution automation system*) pada sistem distribusi tidak seimbang.

Disertasi ini memiliki alur penulisan sebagai berikut. Pada bagian 1 merupakan pendahuluan yang terdiri-dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, batasan penelitian, hipotesis penelitian, dan kontribusi penelitian. Pada bagian 2 diperkenalkan tentang teori analisis aliran daya pada sistem distribusi radial satu fasa, nilai indeks stabilitas tegangan untuk sistem distribusi seimbang, penjelasan komponen *sequence*, rekonfigurasi, dan penambahan kapasitor. Pada bagian 3 disajikan rancangan metodologi penelitian yang digunakan dalam penentuan indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi tiga fasa tidak seimbang. Pada bagian 4 didiskusikan hasil simulasi penentuan indeks stabilitas tegangan dan upaya untuk meningkatkan nilai indeks stabilitas tegangan. Kesimpulan dari hasil penelitian ini disajikan pada bagian 5.

## **1.2. Perumusan Masalah**

Didalam analisis stabilitas tegangan pada sistem distribusi tiga fasa masih digunakan analisis sistem yang seimbang, sedangkan kondisi sesungguhnya sistem tidak seimbang. Untuk itulah diperlukan metode baru yang dapat menentukan nilai indeks stabilitas tegangan untuk sistem distribusi tiga fasa tidak seimbang. Nilai indeks ini merepresentasikan bus terlemah dalam sebuah sistem distribusi tiga fasa tidak seimbang. Bus terlemah adalah bus yang mengalami fluktuasi tegangan terbesar di dalam sebuah sistem distribusi jika terjadi perubahan beban.

Kemudian hasil indeks stabilitas tegangan ini digunakan sebagai dasar untuk upaya peningkatan nilai indeks stabilitas tegangan. Dengan mempertimbangkan hal tersebut, maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana mendapatkan nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem tiga fasa yang tidak seimbang.
2. Bagaimana menentukan bus terlemah pada sistem distribusi tiga fasa tidak seimbang dari nilai indeks stabilitas tegangan yang telah dikembangkan.
3. Tindakan yang dapat diambil agar didapatkan kenaikan nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi.

### 1.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian

Penelitian disertasi ini berisi tentang identifikasi dan peningkatan stabilitas tegangan pada sistem distribusi tiga fasa yang tidak seimbang. Atau dengan kata lain penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Untuk mengembangkan metode baru yang mampu memprediksi nilai indeks stabilitas tegangan untuk sistem distribusi tiga fasa tidak seimbang.
2. Untuk dapat menentukan bus terlemah pada sistem distribusi tiga fasa tidak seimbang dari nilai indeks stabilitas tegangan yang telah dikembangkan.
3. Untuk menentukan sebuah tindakan agar didapatkan kenaikan nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi.

Sedangkan manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

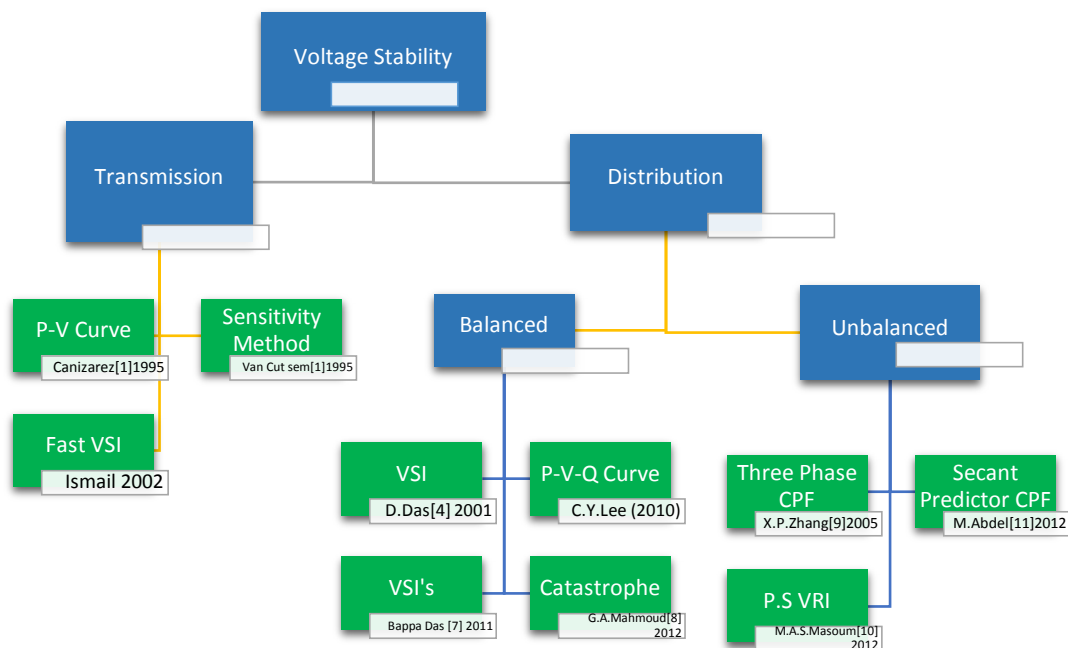
1. Mendapatkan prediksi nilai indeks stabilitas tegangan untuk sistem distribusi tiga fasa tidak seimbang yang lebih cepat dan akurat.
2. Mendapatkan nilai bus terlemah dari hasil indeks stabilitas tegangan untuk metode yang diusulkan.
3. Mendapatkan sebuah mekanisme tindakan-tindakan yang dapat menaikkan nilai indeks stabilitas tegangan.

### 1.4. Batasan Penelitian

Agar lebih terarah, batasan masalah dalam penelitian disertasi ini adalah:

1. Pemodelan indeks stabilitas tegangan yang dilakukan secara statis.
2. Analisis aliran daya yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan metode *network topology*.
3. Metode *network topology* yang digunakan tanpa menggunakan pemodelan trafo dan efek impedansi mutual.
4. Sistem distribusi tiga fasa tidak seimbang yang digunakan terbatas hanya untuk nilai beban yang tidak seimbang tanpa ada fasa yang hilang.
5. Implementasi dilakukan pada sistem distribusi Surabaya Utara 20 kV.
6. Metode untuk mencari nilai VSI tiga fasa yang dikembangkan adalah gabungan antara metode *positive sequence* dari metode indeks stabilitas tegangan yang telah dikembangkan untuk model satu fasa dengan metode *catastrophe theory*.





**Gambar 1.1** Posisi penelitian stabilitas tegangan

7. Peningkatan nilai indeks stabilitas tegangan hanya dilakukan dengan pada sistem distribusi satu fasa/seimbang karena menyesuaikan dengan kondisi lapangan.

### 1.5. Kontribusi / Signifikansi Penelitian

Untuk mengetahui kontribusi dalam penelitian ini, dijelaskan terlebih dahulu mengenai posisi penelitian ini didalam peta penelitian sebidang yang digambarkan dalam gambar 1.1 berikut.

Dengan merujuk *roadmap* posisi penelitian mengenai stabilitas tegangan pada gambar 1.1, alur penelitian mengenai stabilitas tegangan hanya dilakukan pada sistem transmisi yang memiliki konfigurasi *loop*. Nilai stabilitas tegangan dapat dicari dengan menggunakan *sensitivity method* yang didapatkan dari penurunan *jacobian matrix* sistem transmisi. Metode ini cukup rumit untuk dilakukan, sehingga dikembangkan lagi metode untuk mencari nilai stabilitas tegangan dengan lebih mudah. Metode *Continuous Power Flow* (CPF) [9] merupakan salah satu metode yang berhasil dikembangkan untuk menentukan nilai stabilitas tegangan pada tiap bus dengan lebih mudah. Metode CPF ini menggunakan aliran daya yang dilakukan secara berulang dengan kondisi beban yang semakin bertambah pada

suatu bus untuk melihat nilai stabilitas tegangan pada bus yang mengalami perubahan beban tersebut. Hasil dari metode CPF ini adalah kurva P-V yang menunjukkan nilai tegangan kritis dan nilai pembebanan kritis pada suatu bus. CPF ini memerlukan waktu yang lama untuk mendapatkan nilai stabilitas tegangan pada tiap bus. Untuk itulah dikembangkan lagi metode untuk mencari nilai stabilitas tegangan berdasar data aliran daya yang lebih cepat yaitu metode *Fast VSI*.

Metode *Fast VSI* merupakan metode untuk mencari nilai stabilitas tegangan pada tiap saluran dengan menggunakan pendekatan dua bus sejajar. Dengan mengetahui arah dan besar tegangan dan arus dari dua bus yang sejajar maka dapat diketahui nilai stabilitas tegangan dari masing-masing saluran. Nilai maksimal dari *Fast VSI* adalah 1, semakin kecil nilainya maka akan semakin mudah untuk tidak stabil saluran tersebut.

Penelitian mengenai stabilitas tegangan pada sistem distribusi dimulai dengan memodelkan sistem distribusi radial menjadi sebuah sistem *single line equivalent* dikemukakan oleh Jasmon dan Lee [2] dan Gubina dan Strmchnik [3]. Akan tetapi kedua metode ini hanya dapat digunakan untuk perubahan beban yang kecil dan tidak dapat digunakan untuk melihat nilai stabilitas tegangan pada tiap bus. Kemudian muncul metode penentuan VSI yang dapat digunakan untuk melihat indeks stabilitas pada setiap bus yang dikemukakan oleh M. Chakravorty dan D. Das [4]. Setelah teori yang dikembangkan pada [4], muncul metode-metode baru untuk menyelesaikan permasalahan stabilitas tegangan untuk sistem distribusi radial antara lain *Continuation Power Flow* untuk sistem distribusi [5], P-V-Q curve [6], VSI's [7] dan metode terbaru adalah *Catastrophe Theory* [8]. Pada tahun 2005 dikenalkan metode *Continuation Three-Phase Power Flow* [9] yang dapat digunakan untuk menentukan nilai stabilitas tegangan pada sistem distribusi yang tidak seimbang dan hingga saat ini hanya metode *positive sequence voltage ranking index (positive sequence VRI)* [10] dan *backward-forward sweep load-flow analysis method with secant predictor* [11] yang berhasil dikembangkan untuk menyelesaikan permasalahan stabilitas tegangan pada sistem distribusi yang tidak seimbang.

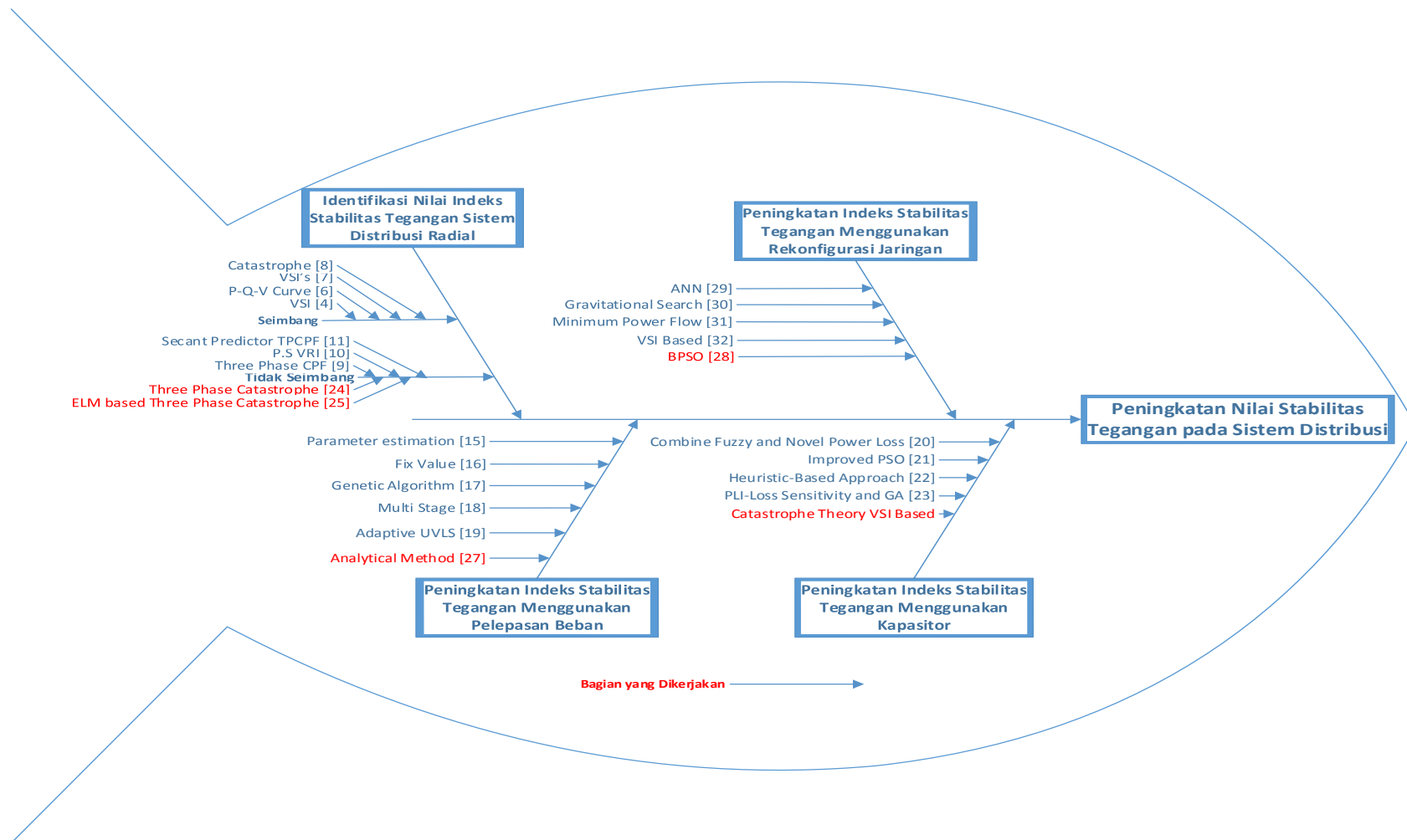
Seiring dengan perkembangan sumber *renewable energy*, sumber energi listrik pada sistem distribusi menjadi lebih kompleks dengan adanya injeksi

*Distributed Generation* (DG). Sehingga permasalahan stabilitas tegangan menjadi salah satu permasalahan yang penting karena sistem distribusi langsung terhubung ke beban, memiliki saluran yang panjang dan beban yang berubah-ubah tiap waktu. Untuk itulah dalam penelitian ini memberikan kontribusi dalam menentukan nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi dengan menggunakan prinsip *positive sequence* yang diimplementasikan pada metode *Catastrophe Theory*.

Metode *positive sequence* yang diusulkan merupakan pengembangan konsep *sequence component*. *Sequence component* yang digunakan untuk menyederhanakan analisis sistem tenaga listrik yang tidak seimbang menjadi komponen urutan positif, negatif dan nol. Nilai *positive sequence* pada *sequence component* inilah yang digunakan pada metode *Catastrophe Theory* untuk menentukan nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi tiga fasa tidak seimbang. Metode *Catastrophe theory* sendiri merupakan metode penentuan nilai indeks stabilitas tegangan yang terbaru dan tidak memerlukan banyak data selain data aliran daya. Metode *catastrophe theory* memiliki keunggulan dalam perhitungan yang lebih sederhana, sehingga waktu yang diperlukan untuk mencari nilai indeks stabilitas tegangan lebih cepat jika dibandingkan metode-metode yang telah ada. Metode usulan ini diberi nama metode *positive sequence based catastrophe theory voltage stability index* (P.S Cat VSI) yang merupakan salah satu kontribusi dalam penelitian ini.

Untuk Selain itu dalam penelitian ini juga berkontribusi dalam pengaplikasian metode *Extreme learning machine* (ELM) pada metode P.S Cat VSI untuk memperoleh nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi. ELM merupakan salah satu pengembangan dari metode Jaringan Saraf Tiruan (JST). ELM adalah *Feed Forward NN* yang hanya memiliki satu *hidden layer* atau biasa disebut dengan *Single Hidden Layer Feed forward neural networks* (SLFNs). Metode ELM ini memiliki keunggulan dalam hal kecepatan *learning* yang lebih cepat jika dibandingkan dengan *Feed Forward NN*. Pada penelitian ini juga memberikan kontribusi dalam aplikasi tindakan-tindakan untuk menaikkan nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi. Untuk lebih detailnya dapat dilihat pada gambar 1.2.





**Gambar 1.2** Fishbone penelitian

## **BAB II**

### **KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1. Sistem Distribusi Tenaga Listrik**

Sistem distribusi merupakan saluran yang digunakan untuk menyalurkan daya listrik sampai ke beban dengan skala yang lebih rendah daripada saluran transmisi. Pada saluran distribusi tegangan telah diturunkan dari saluran transmisi. Saluran distribusi dimulai dari gardu induk yang kemudian disalurkan melalui beberapa penyulang menuju beban di pemukiman atau perkotaan. Sebelum masuk ke perumahan terdapat trafo yang berfungsi untuk menurunkan tegangan dari tegangan menengah menjadi tegangan rendah 380V. Beban industri dengan kapasitas yang menengah pada umumnya dilayani langsung menggunakan tegangan 20 kV.

Pola konsumsi beban pada sistem distribusi sulit untuk diprediksi karena penggunaan energi listrik yang tidak dapat diatur dan lebih dari setengah beban pada sistem distribusi PLN di Indonesia didominasi oleh beban rumah tangga. Beban rumah tangga ini terdiri dari beban-beban satu fasa yang mengakibatkan pembebanan tiap fasa pada sistem distribusi menjadi tidak sama. Kondisi ini menimbulkan ketidakseimbangan pada sistem distribusi.

Ada beberapa bentuk sistem jaring yang umum dipergunakan untuk menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik yaitu [33] :

1. Sistem jaring distribusi radial.
2. Sistem jaring distribusi rangkaian tertutup (*loop*).
3. Sistem jaring distribusi mesh.
4. Sistem jaring distribusi spindle

#### **2.2. Analisis Aliran Daya Sistem Distribusi Radial**

Tujuan utama dari analisis aliran daya adalah untuk mengetahui daya nyata (P) dan daya reaktif (Q) yang mengalir di setiap saluran dengan besar sudut dan fase tegangan pada setiap bus sistem untuk kondisi pembebanan tertentu. Pada umumnya sistem tenaga listrik dibagi menjadi dua kategori, yaitu Sistem Transmisi

dan Sistem Distribusi. Sistem distribusi memiliki beberapa karakteristik diantaranya adalah sebagai berikut [34]:

1. Sebagian besar menggunakan struktur radial
2. Jaringan distribusi yang tidak mengalami transposisi
3. Memiliki bus (*node*) dalam jumlah besar
4. Pembebanan sistem tidak seimbang setiap fasanya
5. Memiliki resistansi (R) dan reaktansi (X) yang tinggi

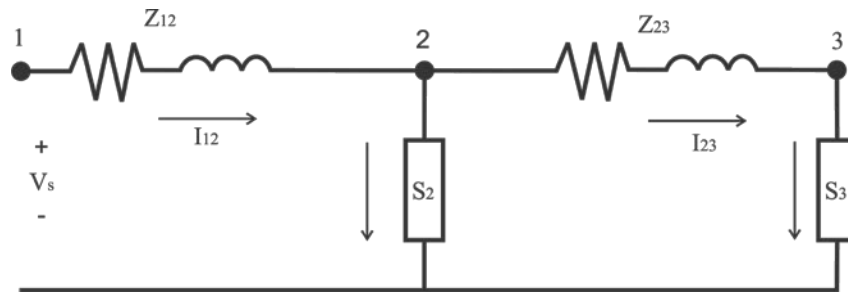
Karakteristik tersebut perlu diperhitungkan ketika melakukan analisis aliran daya (*load flow*) pada sistem distribusi. Dengan alasan tersebut, hasil aliran daya menggunakan *single-phase Newton Raphson* atau *fast decoupled power flow* kurang tepat jika digunakan untuk melakukan analisis aliran daya pada sistem distribusi [35]. Metode yang sering digunakan dalam analisis aliran daya pada sistem jaringan distribusi adalah:

- a. Modifikasi metode Newton Raphson
- b. Metode implisit Z-Bus
- c. Modifikasi metode Gauss-Seidel
- d. Metode *Forward-Backward Sweep*
- e. Metode *Network Topology*

Nilai-nilai yang dihasilkan dalam analisis aliran daya adalah tegangan, daya aktif, daya reaktif, daya total yang mengalir pada saluran distribusi / antar bus-bus hingga daya aktif dan reaktif pada tiap bus. Sub bab di bawah ini akan dijelaskan mengenai analisis aliran daya dengan menggunakan metode *Forward-Backward Sweep* dan *Network Topology*.

### **2.2.1 Metode *Forward-Backward Sweep Power Flow* untuk Sistem Distribusi Radial Satu Fasa [34]**

Sistem distribusi merupakan bagian penyaluran daya yang penting karena letaknya dekat dengan beban. Di bagian inilah beban dapat dipantau dan dilakukan pengaturan kuantitas dan kualitas daya yang dikirim. Untuk melakukan pemantauan, rekayasa, maupun desain suatu sistem distribusi harus dilaksanakan dengan tepat, dan akurat. Sehingga tentunya diperlukan metode analisis aliran daya sebelum melakukan analisis yang lebih lanjut.



**Gambar 2.1** Contoh Rangkaian Analisis Aliran Daya *forward-backward*

Dengan karakteristik khusus dan berbeda dengan saluran transmisi maka diperlukan analisis aliran daya yang tepat digunakan untuk saluran distribusi. Beberapa penelitian dan pengembangan pemodelan matematis saluran distribusi dikenal beberapa metode analisis aliran daya pada saluran distribusi. Salah satu metode yang banyak digunakan dan dikembangkan adalah metode *forward-backward*.

Metode *forward-backward* merupakan metode analisis aliran daya dengan menggunakan prinsip hukum Kirchoff. Metode *forward-backward* terdiri dari dua langkah perhitungan dalam menghitung nilai tegangan yang pasti dalam sistem distribusi radial. Langkah yang pertama adalah menghitung besar arus yang mengalir pada cabang dimulai dari beban terujung hingga menuju bus pertama. Langkah ini disebut dengan metode *forward*. Kemudian arus yang mengalir di tiap cabang dikalikan dengan impedansi saluran untuk mendapatkan besar drop tegangan. Dengan melakukan perhitungan drop tegangan pada tiap saluran dan cabang sistem distribusi radial tersebut, tegangan pada tiap bus beban dapat diketahui. Gambar 2.1 merupakan contoh sederhana perhitungan analisis aliran daya sederhana menggunakan metode *forward-backward*.

Jika merujuk pada gambar 1 diketahui suatu rangkaian listrik dengan tegangan sumber  $V_s = 7200V$  impedansi saluran adalah :

$$Z_{12} = 0.1705 + j0.3490 \, \Omega$$

$$Z_{23} = 0.2273 + j0.4545 \, \Omega$$

Data beban :

$$S_2 = 1500kW + j750 \, kVAR$$

$$S_3 = 900kW + j500 \, kVAR$$



Langkah pertama yang dilakukan adalah dengan menghitung arus yang mengalir pada tiap cabang, dengan asumsi awal tegangan di ujung titik paralel adalah sama dengan tegangan sumber.

$$I_3 = \left( \frac{S_3}{V_3} \right)^* \quad (2.1)$$

$$I_3 = \left( \frac{(900 + j500) \cdot 1000}{7200 \angle 0^\circ} \right)^*$$

$$I_3 = \left( \frac{1029563,014 \angle 29,5^\circ}{7200 \angle 0^\circ} \right)^*$$

$$I_3 = (142,995 \angle 29,05^\circ)^*$$

$$I_3 = 142,995 \angle -29,05^\circ$$

Karena  $I_3$  mengalir pada cabang paralel paling ujung, maka nilainya sama dengan  $I_{23}$ . Kemudian hitung tegangan pada  $V_2$  dengan menghitung besar drop tegangan di  $Z_{23}$ .

$$V_2 = V_3 + Z_{23} \cdot I_{23} \quad (2.2)$$

$$V_2 = 7200 \angle 0^\circ + (0,2273 + j0,4545) \cdot 143 \angle -29,05^\circ$$

$$V_2 = 7260,1 \angle 0,32^\circ$$

Langkah berikutnya adalah menghitung arus  $I_2$ .

$$I_2 = \left( \frac{S_2}{V_2} \right)^* \quad (2.3)$$

$$I_2 = \left( \frac{(1500 + j750) \cdot 1000}{7260,1 \angle 0,32^\circ} \right)^*$$

$$I_2 = (231,0 \angle 26,3^\circ)^*$$

$$I_2 = 231,0 \angle -26,3^\circ$$

Arus  $I_{12}$  dapat dihitung dengan menjumlahkan arus yang mengalir di seluruh cabang.

$$I_{12} = I_{23} + I_2 \quad (2.4)$$

$$I_{12} = 143,0 \angle -29,5^\circ + 231,0 \angle -26,3^\circ$$

$$I_{12} = (125,01 + j69,437) + (207,088 + j102,399)$$

$$I_{12} = (332,098 - j171,836)$$

$$I_{12} = 373,92 \angle -27,36^\circ$$

Kemudian dapat dihitung arus pada titik sumber.

$$V_1 = V_2 + Z_{12} \cdot I_{12} \quad (2.5)$$

$$V_1 = 7260,1 \angle 0,32^\circ + (0,1705 + j0,3409) \cdot 373,9 \angle -26,3^\circ$$

$$V_1 = 7260,1 \angle 0,32^\circ + (0,381 \angle 63,43^\circ) \cdot 373,9 \angle -26,3^\circ$$

$$V_1 = 7260,1 \angle 0,32^\circ + 142,46 \angle 37,13^\circ$$

$$V_1 = 7373,58 + j126,55$$

$$V_1 = 7374,67 \angle 0,983^\circ$$

Untuk melakukan cek konvergensi perhitungan, maka dapat dilakukan perhitungan *error*.

$$Error = ||V_1| - |V_s|| \quad (2.6)$$

$$Error = ||7374,67| - |7200||$$

$$Error = 174,67 \quad (\text{biasanya toleransi error adalah } 0,0001)$$

Setelah dilakukan perhitungan tegangan, kemudian dilanjutkan dengan langkah analisis berikutnya yaitu metode *backward*. Dengan menghitung kembali besar drop tegangan dengan menggunakan arus yang didapat dari perhitungan *forward*. Perhitungan awal dimulai dengan menghitung tegangan pada titik paralel pertama yaitu  $V_2$ .

$$V_2 = V_s + Z_{12} \cdot I_{12} \quad (2.7)$$

$$V_2 = 7200 \angle 0^\circ + (0,1705 + j0,3409) \cdot 373,9 \angle -26,3^\circ$$

$$V_2 = 7085,4 \angle -0,68^\circ$$

Setelah didapatkan nilai  $V_2$  kemudian hitung nilai  $V_3$ .

$$V_3 = V_2 + Z_{23} \cdot I_{23} \quad (2.8)$$

$$V_3 = 7085,4 \angle -0,68^\circ - (0,2273 + j0,4545) \cdot 143 \angle -29,5^\circ$$

$$V_3 = 7026,1 \angle -1,02^\circ$$

Setelah dilakukan kedua langkah di atas, proses perhitungan diulang hingga *error* perhitungan kurang dari nilai toleransi.

### 2.2.2 Metode *Network Topology Power Flow* untuk Sistem Distribusi Radial Satu Fasa [35]

Analisis aliran daya pada sistem distribusi menggunakan metode *forward-backward* cukup efektif dalam menghitung nilai tegangan pada tiap bus. Namun, apabila diterapkan dalam sistem yang kompleks dan rumit dibutuhkan pengembangan metode lebih lanjut. Metode  $Z_{BR}$  [36] merupakan metode pengembangan yang dapat memudahkan analisis studi aliran daya. Metode ini dilakukan dengan menyederhanakan pembentukan matrik impedansi saluran

distribusi dapat mempercepat perhitungan studi aliran daya. Namun, apabila metode  $Z_{BR}$  digunakan untuk melakukan analisis aliran daya pada sistem tiga fasa, maka matrik yang digunakan dikembangkan menjadi matrik untuk tiga fasa. Misalkan dalam satu bus hanya terdapat dua fasa atau hanya satu fasa diperlukan inisialisasi untuk menentukan manakah fasa yang hilang dalam bus tersebut.

Metode *Network Topology* [35] merupakan metode pembentukan matrik impedansi dengan melakukan penelusuran alur/*path* saluran distribusi. Jalur saluran distribusi direpresentasikan dalam sebuah matrik yang menunjukkan arah arus injeksi dari suatu bus ke bus yang lain. Gambar 2.2 dibawah ini adalah *single line diagram* yang digunakan sebagai contoh analisis aliran daya menggunakan metode *Network Topology*.

Langkah-langkah metode *Network Topology* adalah

1. Tentukan nilai matrik *Bus-Injection to Branch-Current* (BIBC)

Matrik BIBC adalah matrik yang merepresentasikan hubungan antara cabang/*branch* dengan saluran yang terhubung.

$$BIBC = \begin{matrix} & \begin{matrix} bus2 & bus3 & bus4 & bus5 & bus6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \\ B5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

2. Cari nilai matrik B

Matrik B merupakan hasil perkalian antara matrik BIBC dengan nilai arus yang mengalir pada tiap saluran.

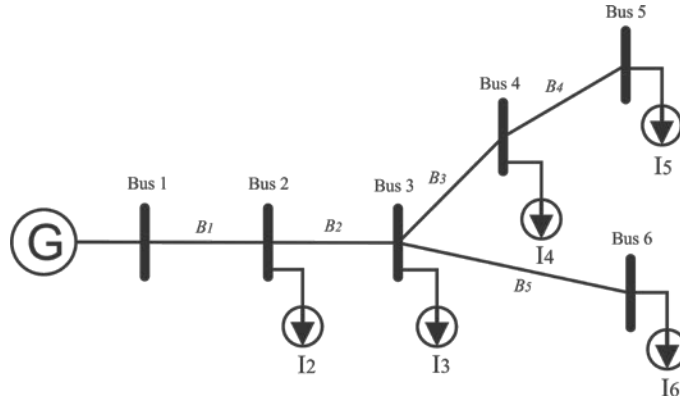
3. Cari nilai matrik *Branch-Current to Bus-Voltage* (BCBV)

Matrik BCBV merupakan matrik yang berisi nilai impedansi dari tiap-tiap saluran yang terhubung dengan jalur bus sistem distribusi. Contoh matrik BCBV terdapat pada persamaan 2.9 dibawah.

4. Hitung nilai  $\Delta V$

Nilai  $\Delta V$  didapatkan dari persamaan 2.9.

5. Ulangi proses satu sampai empat sampai nilai eror kurang dari toleransi



**Gambar 2.2** Single line diagram contoh metode *Network Topology*

Maka untuk contoh single line diagram di atas, K-matrik-nya adalah :

$$\begin{array}{ccccc}
 & bus2 & bus3 & bus4 & bus5 & bus6 \\
 \begin{array}{l} B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \\ B5 \end{array} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Pada contoh sebelumnya, dapat disimpulkan persamaan menghitung drop tegangan.

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix}$$

$$I_i^k = \text{conj} \left( \frac{P_i + jQ_i}{V_i^k} \right) \quad (2.9)$$

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] \quad (2.10)$$

$$[\Delta V^k] = [DLF][I^k] \quad (2.11)$$

Update nilai tegangan untuk iterasi berikutnya dengan persamaan (2.12)

$$[V^{k+1}] = [V_{no\ load}] - [\Delta V^k] \quad (2.12)$$

Ulangi langkah pada persamaan (2.9) s ampai (2.12) s ampai *error* kurang dari toleransi. Nilai *error* dihitung pada persamaan (2.13) berikut

$$\text{error} = (|I_i^{k+1}| - |I_i^k|) \quad (2.13)$$

Apabila bentuk dan komposisi dari matrik BIBC diamati, terdapat persamaan komposisi matrik. Matrik BIBC memiliki komponen yang nilainya berlawanan dengan setiap komponen K-matrik. K-matrik adalah sebuah matrik yang berisikan nilai nol dan satu yang merepresentasikan hubungan antara bus dengan saluran yang terhubung antar bus.

Untuk membentuk K-matrik digunakan aturan penelusuran jalur.

- $k_{ij} = 1$ , jika cabang  $i$  berada pada jalur antara bus  $j$  dan bus referensi dan memiliki arah yang sama
- $k_{ij} = -1$ , jika cabang  $i$  berada pada jalur antara bus  $j$  dan bus referensi dan memiliki arah yang berlawanan
- $k_{ij} = 0$ , jika cabang  $i$  tidak berada pada jalur antara bus  $j$  dan bus referensi

Sehingga dapat dirumuskan hubungan antara K-matrik dan BIBC sebagai berikut ;

$$[BIBC] = -[K - \text{matrik}] \quad (2.14)$$

Sedangkan bila matrik BIBC kita *transpose* komposisinya maka akan terbentuk matrik yang berkorelasi dengan matrik BCBV.

$$[BIBC]^T = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Apabila matrik  $[BIBC]^T$  dikalikan per komponen (perkalian dot) dengan matrik impedansi *full branch* ( $ZF_{BR}$ ), maka akan didapatkan matrik BCBV.

$$BCBV = -[K - \text{matrik}]^T \cdot [ZF_{BR}] \quad (2.15)$$

$$BCBV = - \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \end{bmatrix}$$

Sehingga, untuk metode *Network Topology* dapat disimpulkan formula mencari drop tegangan di tiap saluran.

$$[\Delta V] = -[K] \times -[K]^T \cdot [ZF_{BR}] \times [I] \quad (2.16)$$

iterasi dilakukan sampai didapatkan nilai *error*  $\Delta V$  kurang dari nilai yang diinginkan.

### 2.2.3 Network Topology Power Flow pada Sistem Distribusi Tiga Fasa [26]

Untuk analisis tiga fasa, dapat digunakan konfigurasi K-matrik dengan dimensi tiga kali dari dimensi K-matrik untuk analisis satu fasa. Komposisi per komponen untuk analisis tiga fasa dalam suatu K-matrik adalah sebagai berikut :

$$\begin{matrix} & \text{fasa a} & \text{fasa b} & \text{fasa c} \\ \begin{matrix} \text{fasa a} \\ \text{fasa b} \\ \text{fasa c} \end{matrix} & \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Komponen matrik  $Z_{ij}$  merupakan impedansi akibat adanya *mutual impedance* antara fasa  $i$  dan fasa  $j$ .

Apabila kita ambil contoh rangkaian pada gambar 2.2, maka K-matrik dibentuk sebagai berikut :

$$K = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Setelah didapatkan nilai K-matrik untuk sistem tiga fasa maka nilai  $\Delta V$  dapat dicari dengan menggunakan persamaan (2.16).

### 2.3. Stabilitas Tegangan

Kestabilan tegangan dapat didefinisikan sebagai kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan pada semua bus pada waktu normal dan setelah gangguan [20]. Kestabilan tegangan dapat dikategorikan menjadi 2, yaitu kestabilan tegangan large disturbance dan kestabilan tegangan small disturbance.

Kestabilan tegangan large disturbance adalah kemampuan sistem untuk mengontrol tegangan setelah terjadi gangguan yang besar seperti kehilangan beban atau outage generation. Sedangkan, kestabilan tegangan small-disturbance adalah kemampuan sistem untuk mengontrol tegangan setelah gangguan kecil terjadi seperti perubahan beban.

Voltage collapse adalah sebuah fenomena jatuhnya tegangan yang berkelanjutan akibat adanya gangguan, sehingga sistem kelistrikan dapat blackout atau padam total. Voltage collapse terjadi jika nilai tegangan akan jatuh ketika beban terus bertambah meskipun nilai sumber energi listrik masih mencukupi daya beban [4]. Permasalahan stabilitas tegangan merupakan salah satu permasalahan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik. Penyebab dari permasalahan ini adalah pembebanan yang berlebih secara terus-menerus. Pada sistem transmisi, permasalahan ini sudah cukup lama diketahui dan telah banyak metode-metode yang dikembangkan untuk mengetahui nilai stabilitas tegangan dari sebuah sistem tenaga listrik [1].

#### **2.4. Stabilitas Tegangan pada Sistem Distribusi Seimbang**

Penggunaan metode penentuan nilai stabilitas tegangan pada sistem distribusi tidak dapat menggunakan metode yang sama dengan sistem transmisi. Hal ini diakibatkan oleh sistem distribusi yang radial, nilai rasio  $X/R$  yang rendah, dan beban yang tidak seimbang. Untuk menyelesaikan permasalahan stabilitas tegangan di sistem distribusi, digunakan pendekatan *single line equivalent* yang dikemukakan oleh Jasmon dan Lee [2] dan Gubina dan Strmchnik [3]. Kedua metode ini hanya dapat digunakan untuk mengetahui nilai stabilitas tegangan yang diakibatkan oleh fluktuasi beban yang kecil dan tidak dapat digunakan untuk melihat nilai stabilitas tegangan pada tiap bus, karena sistem distribusi dimodelkan menjadi satu bus saja.

Kemudian M. Chakravorty dan D. Das [4] mengemukakan teori untuk mencari nilai stabilitas tegangan dengan menggunakan pendekatan dua bus atau yang dikenal dengan teori *voltage stability index* (VSI), yaitu bus sisi kirim dan bus untuk sisi terima. Dengan pendekatan tersebut maka nilai stabilitas tegangan pada

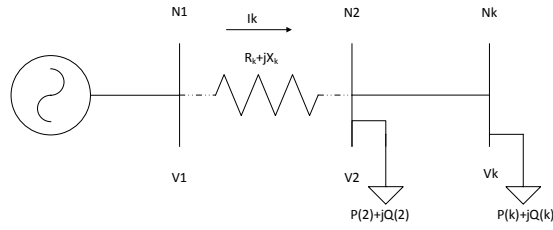
setiap bus dapat dihitung. Berdasarkan nilai VSI pada [4] nilai VSI yang semakin kecil berarti bus tersebut semakin mendekati nilai *voltage collapse*.

Selain teori ini, terdapat beberapa teori yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan stabilitas tegangan untuk sistem distribusi radial antara lain *Continuation Power Flow* untuk sistem distribusi [5] dan *P-V-Q curve* [6]. Akan tetapi metode [4] banyak digunakan karena kemudahan perhitungan nilai VSI yang dihasilkan. Dari [4] muncul beberapa teori yang merupakan pengembangan dari teori tersebut, antara lain adalah VSI's [7] dan *Catastrophe Theory* [8] yang merupakan metode terbaru untuk mencari nilai VSI.

Namun, teori-teori yang telah dikembangkan diatas hanya terbatas untuk sistem distribusi radial satu fasa. Pada aplikasi di lapangan, kondisi sistem distribusi tidak dapat dipertahankan seimbang. Untuk itulah diperlukan sebuah metode untuk menghitung nilai stabilitas tegangan pada sebuah sistem distribusi radial yang tidak seimbang. Sampai sekarang hanya terdapat sedikit metode untuk menghitung nilai stabilitas tegangan pada sebuah sistem yang tidak seimbang, antara lain adalah *Continuation Three-Phase Power Flow* [9], *positive sequence voltage ranking index (positive sequence VRI)* [10] dan *backward-forward sweep load-flow analysis method with secant predictor* [11].

Metode *Continuation Three-Phase Power Flow* [9] merupakan metode untuk menentukan nilai stabilitas tegangan pada sistem distribusi yang tidak seimbang dengan menggambarkan kurva P-V untuk komponen urutan positif masing-masing bus. Pada metode [11] untuk mempersingkat waktu komputasi maka digunakan *secant predictor*, namun pada metode ini tidak digunakan *sequence component* tetapi digunakan gambar masing-masing fasa untuk mengetahui kondisi stabilitas tegangan. Metode [10] mengambil konsep perhitungan VSI [4] untuk sistem distribusi satu fasa pada [10] didapatkan nilai stabilitas tegangan pada sistem distribusi radial yang tidak seimbang, dengan mengambil komponen urutan positifnya. Hingga saat ini hanya metode-metode tersebut yang telah dikembangkan untuk menyelesaikan permasalahan stabilitas tegangan pada sistem distribusi yang tidak seimbang.





**Gambar 2.3** Sebuah sistem distribusi radial

Metode penentuan indeks stabilitas tegangan tiga fasa pada [9] dan [10] menggunakan komponen *positive sequence* untuk menyederhanakan persamaan pada saat kondisi sistem mengalami ketidakseimbangan.

#### 2.4.1 Voltage Stability Index (VSI) [4]

*Voltage Stability Index* (VSI) digunakan untuk mengetahui stabilitas tegangan terhadap *voltage collapse* pada jaringan distribusi.

Pada gambar 2.3 penentuan nilai VSI untuk sistem distribusi radial sederhana [4] dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$I_k = \frac{V_1 - V_2}{R_k + jX_k} \quad (2.17)$$

$$P_2 - jQ_2 = V_2^* I_k \quad (2.18)$$

Jika persamaan (2.17) dan (2.18) digabungkan maka didapatkan persamaan berikut:

$$|V_2|^4 + 2(P_2 R_k + Q_2 X_k - 0.5|V_2|^2)|V_2|^2 + (P_2^2 + Q_2^2)Z_k^2 = 0 \quad (2.19)$$

Persamaan berikut dapat disederhanakan menjadi:

$$b_k = 2(P_2 R_k + Q_2 X_k - 0.5|V_2|^2) \quad (2.20)$$

$$c_k = Z_k^2 (P_2^2 + Q_2^2) \quad (2.21)$$

$$h_k = 0 \quad (2.22)$$

Persamaan (2.20), (2.21), dan (2.22) disubstitusi kedalam persamaan (2.19), maka persamaan (2.19) menjadi:

$$|V_2|^4 + b_k |V_2|^2 + h_k |V_2| + c_k = 0 \quad (2.23)$$

Persamaan (2.23) memiliki empat kemungkinan jawaban [4] untuk nilai tegangan, yaitu:

- $0.707 \left[ b_k - (b_k^2 - 4c_k)^{0.5} \right]^{0.5}$
- $-0.707 \left[ b_k - (b_k^2 - 4c_k)^{0.5} \right]^{0.5}$
- $-0.707 \left[ b_k + (b_k^2 - 4c_k)^{0.5} \right]^{0.5}$
- $0.707 \left[ b_k + (b_k^2 - 4c_k)^{0.5} \right]^{0.5}$

Penyelesaian kedua dan ketiga dari keempat kemungkinan jawaban diatas tidak dapat digunakan karena nilai tegangan yang terhitung memiliki nilai negatif. Sedangkan untuk kemungkinan jawaban pertama tidak dapat digunakan karena nilainya mendekati nol sehingga jawaban yang memungkinkan adalah yang keempat.

$$V_2 = 0.707 \left[ b_k + (b_k^2 - 4c_k)^{0.5} \right]^{0.5} \quad (2.24)$$

Dari persamaan diatas dapat memiliki nilai yang valid jika solusi aliran daya untuk sistem radial memenuhi nilai sebagai berikut

$$b_k^2 - 4c_k \geq 0 \quad (2.25)$$

Jika nilai b dan c dimasukkan kedalam persamaan (2.25) maka didapatkan persamaan sebagai berikut

$$\left( |V_1|^2 - 2P_2R_k - 2Q_2X_k \right)^2 - 4(P_2R_k + Q_2X_k)|V_1|^2 \geq 0 \quad (2.26)$$

Persamaan diatas dapat disederhanakan menjadi

$$|V_1|^4 - 4(P_2X_k - Q_2R_k)^2 - 4(P_2R_k + Q_2X_k)|V_1|^2 \geq 0 \quad (2.27)$$

Maka nilai VSI untuk sistem distribusi radial dapat dicari melalui persamaan berikut

$$VSI(2) = |V_1|^4 - 4(P_2X_k - Q_2R_k)^2 - 4(P_2R_k + Q_2X_k)|V_1|^2 \quad (2.28)$$

#### 2.4.2 Catastrophe Theory VSI [8]

Dalam ilmu matematika *Catastrophe Theory* adalah cabang dari teori bifurkasi dalam studi sistem dinamis. Teori bifurkasi mempelajari dan mengklasifikasikan fenomena kejadian/gangguan berdasarkan respon perubahan sistem terhadap gangguan kemudian menganalisis bagaimana sifat kualitatif dari solusi persamaan yang muncul. Hal ini dapat menyebabkan perubahan tiba-tiba dan

dramatis, misalnya kapan terjadinya ketidakstabilan dan besarnya nilai yang menyebabkan ketidakstabilan tersebut.

*Catastrophe Theory* pertama kali diperkenalkan oleh seorang ilmuwan Perancis bernama René Thom pada tahun 1960an. Pada tahun 1970-an *Catastrophe Theory* menjadi populer karena seorang ilmuwan bernama Christopher Zeeman menemukan bahwa nilai *long-run stability* dapat diidentifikasi secara detail dengan menggunakan fungsi potensial (fungsi Lyapunov) yang dijelaskan pada metode *Catastrophe Theory*.

Dalam sistem distribusi tenaga listrik fluktuasi beban sangat sering terjadi. Fenomena fluktuasi beban sangat sering terjadi dengan kisaran fluktuasi yang besar. Nilai fluktuasi beban yang besar ini terjadi di bus yang dapat menimbulkan permasalahan ketidakstabilan tegangan. Tegangan sistem yang semula turun secara periodik dapat tiba-tiba berubah dengan sangat drastis dalam suatu *range* penambahan nilai beban tertentu. Perubahan mendadak (atau melompat fenomena) dapat dianalisis dengan *Catastrophe Theory* untuk mengidentifikasi bagaimana keseimbangan sistem berubah. Di dalam penerapannya, *Catastrophe Theory* dapat digunakan untuk mengidentifikasi nilai indeks stabilitas tegangan pada tiap bus.

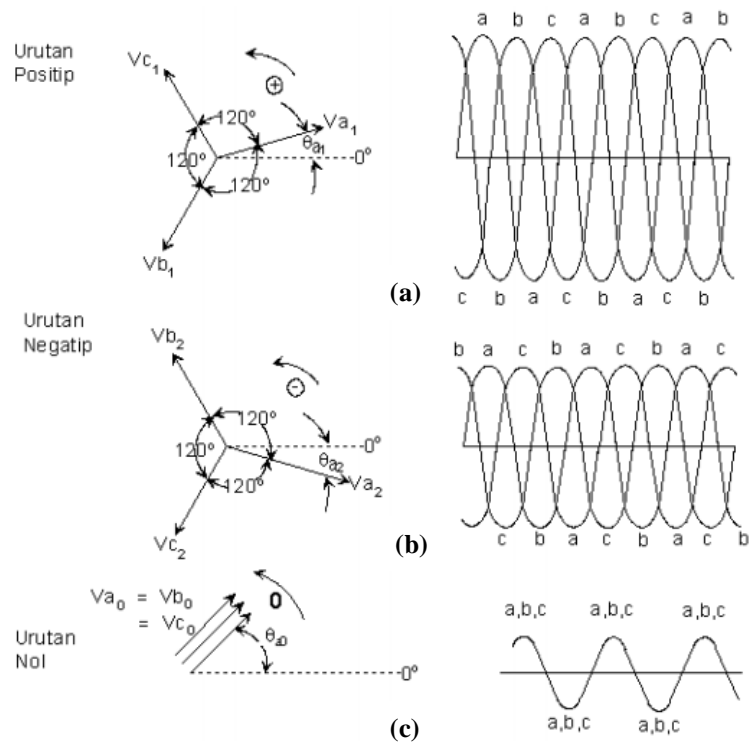
Jika dilihat menggunakan *Catastrophe Theory*, nilai bifurkasi pada sistem tenaga listrik yang diberikan pada persamaan (2.27) merupakan representasi dari batas wilayah nilai tegangan kritis. Apabila batas tersebut dilewati, maka sistem akan *collapse*. Dalam hal ini dengan nilai negatif minimum  $b_{(jj)}$  dianggap bus paling kritis. Yaitu bus yang paling sensitif terhadap perubahan beban yang dapat direpresentasikan kedalam persamaan dibawah ini :

$$Cat\_VSI(2) = (P_{(m2)}R_{(jj)} + Q_{(m2)}X_{(jj)} - 0.5|V_{(m1)}|^2)^2 - Z_{(jj)}^2(P_{(m2)}^2 + Q_{(m2)}^2) \quad (2.29)$$

Nilai maksimum dari indeks stabilitas tegangan dengan menggunakan metode catastrophe theory untuk kondisi tegangan 1 p.u dan beban nol adalah 0.25.

## 2.5. Sequence Component [37]

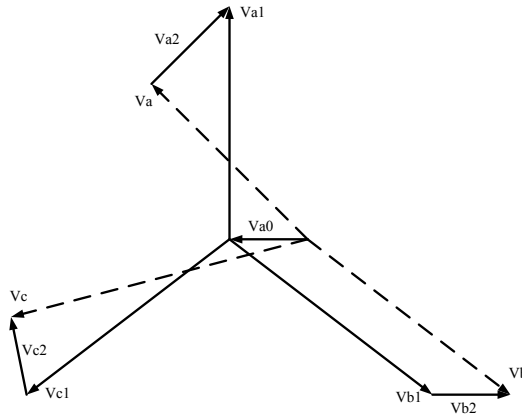
Pada kondisi aktual jaringan sistem tiga fasa memiliki beban tidak seimbang. Sistem tiga fasa yang tidak seimbang ini dapat diuraikan menjadi tiga komponen simetris untuk memudahkan analisis, yaitu :



**Gambar 2.4** Komponen simetris tegangan dari sistem tiga fasa tidak seimbang, (a) urutan positif, (b) urutan negatif, (c) urutan nol

1. Komponen urutan positif (*positive sequence*), yang fasornya sama besar dan mempunyai beda fasa  $120^\circ$ , serta urutan fasanya sama dengan urutan fasa aslinya.
2. Komponen urutan negatif (*negative sequence*), yang fasornya sama besar dan mempunyai beda fasa  $120^\circ$ , tetapi urutan fasanya berlawanan dengan urutan fasa aslinya.
3. Komponen urutan nol (*zero sequence*), yang fasornya sama besar dan dengan pergeseran fasa nol antara fasor yang satu dengan yang lain.

Gambar 2.4 merupakan diagram fasor dari komponen simetris tegangan yang diuraikan menjadi tiga *sequence component*. Notasi yang digunakan pada komponen simetris tersebut biasanya diberikan angka 1, 2, dan 0 pada komponen arus dan tegangannya. Jadi, komponen urutan positif dari tegangan  $V_a$ ,  $V_b$  dan  $V_c$  adalah  $V_{a1}$ ,  $V_{b1}$  dan  $V_{c1}$ , komponen urutan negatifnya adalah  $V_{a2}$ ,  $V_{b2}$  dan  $V_{c2}$ , serta komponen urutan nolnya adalah  $V_{a0}$ ,  $V_{b0}$  dan  $V_{c0}$ . Persamaan tegangan sistemnya merupakan penjumlahan dari masing-masing komponen simetrisnya, yaitu :



**Gambar 2.5** Tegangan sistem sebagai penjumlahan dari komponen simetris

$$\begin{aligned}
 V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\
 V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\
 V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

Dari gambar 2.5 didapatkan hubungan antara komponen-komponen simetrisnya, yaitu :

$$\begin{aligned}
 \bar{V}_a &= \bar{V}_{a0} + \bar{V}_{a1} + \bar{V}_{a2} \\
 \bar{V}_b &= \bar{V}_{b0} + \bar{V}_{b1} + \bar{V}_{b2} \\
 \bar{V}_c &= \bar{V}_{c0} + \bar{V}_{c1} + \bar{V}_{c2}
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

Dengan operator  $a = 1 \angle 120^\circ = -0,5 + j0,866$  dan  $a^2 = 1 \angle 240^\circ = 1 \angle -120^\circ = -0,5 - j0,866$ , maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \bar{V}_a &= \bar{V}_{a0} + \bar{V}_{a1} + \bar{V}_{a2} \\
 \bar{V}_b &= \bar{V}_{a0} + a^2 \bar{V}_{a1} + a \bar{V}_{a2} \\
 \bar{V}_c &= \bar{V}_{a0} + a \bar{V}_{a1} + a^2 \bar{V}_{a2}
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

Dimana persamaan (2.32) dapat dinyatakan dalam bentuk matriks :

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{a0} \\ \bar{V}_{a1} \\ \bar{V}_{a2} \end{bmatrix} \\
 A &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}, \text{ maka } A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.33}$$

Dengan mengalikan matriks tersebut dengan matriks *invers*-nya ( $A^{-1}$ ) maka diperoleh :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{a0} \\ \bar{V}_{a1} \\ \bar{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} \tag{2.34}$$

Sehingga, hubungan antara komponen simetris dan tegangan sistemnya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V_{a0} &= \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \\ V_{a1} &= \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \\ V_{a2} &= \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \end{aligned} \quad (2.35)$$

Persamaan tegangan komponen simetris tersebut berlaku juga pada persamaan arus dengan menggunakan matriks A dan A<sup>-1</sup> yang dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Pada sistem 3 fasa dengan netral diketanahkan, jumlah arus saluran sama dengan arus I<sub>n</sub> yang mengalir melalui netral ke tanah, maka

$$I_a + I_b + I_c = I_n \quad (2.38)$$

Dari persamaan (2.34) didapatkan nilai I<sub>abc</sub> sebagai berikut :

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \\ I_b &= I_{a0} + a^2I_{a1} + aI_{a2} \\ I_c &= I_{a0} + aI_{a1} + a^2I_{a2} \end{aligned} \quad (2.39)$$

Arus netral yang mengalir adalah jumlah arus yang mengalir pada setiap fasanya. Jadi, jika persamaan (2.39) disubsitusikan kedalam persamaan (2.38) maka persamaan arus netralnya menjadi:

$$I_n = 3I_{a0} \quad (2.40)$$

Untuk beban atau belitan transformator yang terhubung delta dimana tidak terdapat saluran netral, maka arus tidak mengandung komponen urutan nol.

## 2.6. Extreme Learning Machine [38], [39]

Metode *Extreme Learning Machine (ELM)* adalah sebuah metode algoritma pembelajaran baru menggunakan jaringan syaraf tiruan, yang dapat diaplikasikan dengan mudah, serta dapat mencapai *error training* dan bobot terkecil, mempunyai performansi generalisasi yang bagus dan mampu bekerja dengan cepat. Hal ini karena *Extreme Learning Machine* memilih bobot input dan bias tersembunyi secara random, sehingga mempunyai kelebihan seperti yang disebutkan diatas.

Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh Guang-Bin Huang (2004) sebagai metode pembelajaran baru. Selama ini, *Neural Network* banyak digunakan karena kemampuannya di dalam: (1) melakukan perkiraan pemetaan langsung pada sistem *nonlinear* secara langsung dari *input* sampel, serta (2) mampu menyediakan model skala besar untuk fenomena natural maupun buatan dengan tingkat kesulitan tinggi bila ditangani menggunakan teknik parametrik klasik. Beberapa hal menurut [39] yang menyebabkan proses pembelajaran *back propagation* memerlukan waktu yang lama adalah parameter yang digunakan yaitu bobot *input* dan *hidden* biasanya memerlukan *tuning* terlebih dahulu yang prosesnya harus ditentukan secara iteratif. Bahkan untuk proses *feedforward*, bobot *input* dan *hidden bias* masih ditentukan secara manual. Untuk mendapatkan performa pembelajaran yang baik, penggunaan *gradient descent* pada algoritma *neural network* mengakibatkan proses pembelajarannya memerlukan banyak iterasi. Pada *backpropagation neural network*, lapisan satu dengan lapisan lainnya saling terhubung. Hal ini dapat mempengaruhi kecepatan pembelajaran dan memerlukan waktu yang cukup lama. Selain itu algoritma dari *back propagation neural network* memungkinkan solusi yang dihasilkan terjebak pada *local minimum*.

Kelemahan lain dari penggunaan *Neural Network* yang mencolok adalah proses *learning speed*-nya yang rendah. Proses pembelajaran yang ada selama ini membutuhkan waktu beberapa jam hingga waktu yang lebih lama. Menurut Huang et al [38], beberapa hal yang menyebabkan proses *learning rate* pada *Neural Network* rendah adalah:

1. Penggunaan *gradient based learning algorithm* untuk proses *training*
2. Parameter yang ada pada jaringan keseluruhan ditentukan dengan *iterative* menggunakan metode pembelajaran sebelumnya.

Pada pembelajaran dengan menggunakan *neural network*, penggunaan *conventional gradient based learning algorithm* seperti *Backpropagation* (BP) penentuan parameter seperti bobot *input*, *hidden bias* yang menghubungkan antara lapisan satu dengan yang lainnya ditentukan secara manual, sehingga membutuhkan *learning speed* yang lama dan sering terjebak pada *local minimum*.

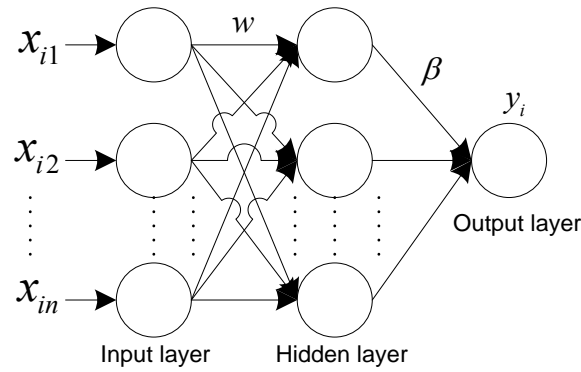
*Extreme Learning Machine* melakukan proses pemilihan secara random untuk memilih bobot *input* dan *hidden bias*. Hal ini menjadikan ELM memiliki *learning speed* yang cepat dan memberikan hasil yang lebih bagus.

Untuk mengatasi kelemahan pada kecepatan pembelajaran tersebut, maka digunakan metode *Extreme Learning Machine*. Beberapa keuntungan dari metode *Extreme Learning Machine* adalah:

1. Mudah digunakan dan tidak memerlukan parameter yang harus dituning kecuali menggunakan arsitektur jaringan standart.
2. Algoritma pembelajaran ini lebih cepat dibandingkan dengan algoritma pembelajaran konvensional seperti *Back Propagation Neural Network*. Untuk skala besar dengan aplikasi kompleks, proses pembelajaran dapat dicapai dalam waktu lebih cepat bila dibandingkan dengan metode konvensional;
3. Generalisasi kinerja yang sama tinggi seperti BP (*Back Propagation*) dan SVM (*Supervisory Vector Machine*);
4. Dapat menggunakan berbagai fungsi aktivasi. Namun, dari berbagai keuntungan menggunakan metode *Extreme Learning Machine*, keunggulan yang paling menonjol adalah kecepatan dalam proses pelatihan yang jauh lebih cepat bila dibandingkan dengan metode konvensional lainnya.

Dari [38], menyatakan bahwa bobot *input* dan *hidden bias* pada *single layer feedforward network* dipilih secara acak apabila fungsi aktivasi pada *hidden layer* ditentukan pada nilai tak terbatas. Setelah pemilihan secara acak pada bobot *input* dan *hidden bias*, selanjutnya *single layer feedforward network* merupakan sebuah sistem *linear* dan bobot *output* atau bobot yang menghubungkan antara *hidden layer* ke *output* data ditentukan menggunakan perhitungan analitis yaitu menggunakan operasi *inverse* dari matrik *output hidden layer*. Konsep algoritma ini lah hingga metode ini disebut dengan *Extreme Learning Machine*.





**Gambar 2.6.** Struktur ELM

ELM juga memiliki *learning speed* lebih cepat dan memberikan performa generalisasi yang lebih baik.

Model matematis ELM telah diberikan pada [20] terdapat pada gambar 2.6 diatas:

Dengan  $N$  adalah total sampel  $(X_i, t_i)$

$$X_i = [X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}]^T \in R^n \quad (1)$$

$$X_t = [X_{t1}, X_{t2}, \dots, X_{tn}]^T \in R^n \quad (2)$$

Persamaan matematis dari standar SLFNs dengan total *hidden nodes*  $N$  dan *activation function*  $(x)$  adalah sebagai berikut:

$$j = 1, 2, \dots, N$$

$$w_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in})^T = \text{weight vector yang menghubungkan hidden nodes ke-} i \text{ dan nodes input.}$$

$$\beta_i = (\beta_{i1}, \beta_{i2}, \dots, \beta_{in})^T = \text{weight vector yang menghubungkan hidden nodes ke-} i \text{ and nodes output.}$$

$$b_i = \text{Threshold dari hidden nodes ke-} i.$$

$$y_j = \text{Output produk.}$$

## 2.7. Rekonfigurasi Jaringan [12-14]

Sistem distribusi disuplai dari Gardu Induk (GI) yang terbagi menjadi beberapa penyulang menuju ke pelanggan listrik. Tipe sistem distribusi yang digunakan adalah radial, dimana antara penyulang yang satu dengan yang lain dapat dihubungkan dengan mengoperasikan *tie switch*. *Tie switch* dengan posisi terbuka pada kondisi normal ini sangat berperan untuk proses rekonfigurasi jaringan

sehingga rugi daya dapat berkurang. Jika suatu penyulang mengalami gangguan, daerah yang padam sementara dapat disuplai kembali secara cepat dengan membuat konfigurasi jaringan baru dengan mengoperasikan beberapa *tie switch*. Dalam jaringan distribusi tenaga listrik, mengubah status *tie switch* dari *normally open* (NO) ke *normally closed* (NC) atau sebaliknya merupakan perubahan struktur topologi dari jaringan distribusi.

Rekonfigurasi Jaringan adalah mengatur ulang konfigurasi jaringan dengan cara membuka dan menutup *switch* pada jaringan distribusi. Rekonfigurasi jaringan dapat mengurangi rugi jaringan serta meningkatkan keandalan sistem distribusi.

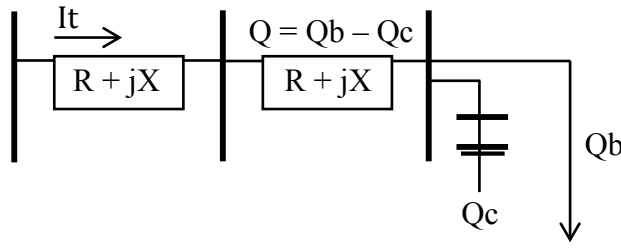
Dalam kondisi operasi normal, rekonfigurasi jaringan dilakukan karena dua alasan [12] yaitu :

1. Mengurangi rugi jaringan pada sistem (*loss reduction*).
2. Mendapatkan pembebanan yang merata pada tiap fasa untuk mencegah pembebanan yang tidak seimbang pada jaringan (*load balancing*).

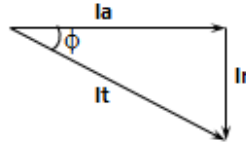
Terdapat beberapa metode yang dilakukan untuk mengoptimasi nilai rekonfigurasi jaringan antara lain adalah *Branch Exchange* [12], *Reconfiguration of Radial Electrical Distribution Network through Minimum Current Circular Updating Mechanism Method* [13], *Object Oriented Programming* [14] dan metode pendekatan *Artificial Intelligent* (AI) [28], [42], [43].

Metode *Minimum Current Circular Updating Mechanism* [13] berdasarkan nilai arus injeksi terkecil. Arus injeksi pada tiap percabangan inilah yang nantinya digunakan sebagai parameter untuk rekonfigurasi jaringan distribusi. Arus injeksi yang nilainya kecil akan mendapatkan nilai rugi-rugi daya total jaringan yang kecil pula. Metode *Object Oriented Programming* [14] untuk melakukan rekonfigurasi jaringan, digunakan teknik optimasi dengan menggunakan *binary integer programming* (BIP). Dari hasil BIP didapatkan nilai rekonfigurasi yang paling optimal.

Metode *simple branch exchange* [12] merupakan metode untuk menentukan rekonfigurasi jaringan. Rekonfigurasi dilakukan dengan mengubah *on* atau *off switch* dan saluran pada setiap konfigurasi jaringan distribusi yang mungkin untuk



**Gambar 2.7** Pengaruh pemasangan kapasitor pada saluran distribusi



**Gambar 2.8** Segitiga arus

mendapatkan rugi-rugi daya yang terkecil. Rumus untuk meminimalkan rugi-rugi daya adalah sebagai berikut

$$P_{loss} = \sum r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (2.41)$$

Metode ini bertujuan untuk mendapatkan konfigurasi jaringan yang baru berdasarkan rugi-rugi daya yang terkecil.

## 2.8. Penambahan Kapasitor [21-24]

Kapasitor merupakan komponen kompensator yang memiliki banyak fungsi. Fungsi kapasitor adalah untuk memperbaiki faktor daya, mengurangi kerugian daya (*losses*) dan pengatur tegangan. Kapasitor bekerja dengan cara mengkompensasi daya reaktif pada sistem [34].

Pemasangan kapasitor pada saluran distribusi menyebabkan nilai daya reaktif saluran menjadi turun. Pengaruh pemasangan kapasitor terlihat seperti pada gambar 2.7.

Gambar 2.7 menunjukkan pengaruh pemasangan kapasitor terhadap rugi jaringan daya aktif. Daya saluran yang semula sama dengan daya reaktif beban dikurangi dengan daya reaktif kapasitor sehingga daya reaktif saluran berkurang. Daya reaktif saluran menyebabkan arus reaktif ( $I_r$ ) menjadi berkurang seperti pada persamaan (2.42).

$$Q = V \times I_r \times \sin\phi \quad (2.42)$$

Gambar 2.8 merupakan segitiga arus. Gambar 2.8 menunjukkan pengaruh arus reaktif ( $I_r$ ) terhadap arus total ( $I_t$ ).

Arus total ( $I_t$ ) didapatkan dari penjumlahan dari arus reaktif ( $I_r$ ) dan arus aktif ( $I_a$ ). Persamaan untuk mencari arus total seperti pada persamaan (2.43).

$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \quad (2.43)$$

Arus yang mengalir pada saluran adalah arus total ( $I_t$ ). Rugi jaringan daya aktif didapatkan dari persamaan (2.44).

$$P_{loss} = I_t^2 \times R \quad (2.44)$$

Pemasangan kapasitor pada saluran distribusi menyebabkan daya reaktif saluran berkurang. Daya reaktif berkurang menyebabkan arus reaktif pada saluran berkurang. Arus reaktif berkurang menyebabkan arus total yang mengalir pada saluran berkurang. Sehingga rugi jaringan akan berkurang karena arus total berkurang.

Secara umum, penambahan kapasitor yang biasa dilakukan pada bus yang memiliki indeks *losses* tertinggi / *power loss index* (PLI) [20]. Nilai indeks PLI ini dapat dinyatakan kedalam persamaan (2.45) berikut ini:

$$PLI(m) = \frac{LR(m) - LR_{\min}}{LR_{\max} - LR_{\min}} \quad (2.45)$$

Dengan masing-masing parameter adalah

$LR(m)$ : pengurangan *losses* di bus  $m$

$LR_{\min}$ : Pengurangan *losses* terkecil

$LR_{\max}$ : Pengurangan *losses* terbesar

Nilai indeks *losses* pada suatu bus merupakan perbandingan antara nilai pengurangan rugi-rugi ( $LR$ ) pada bus tersebut dikurangi dengan pengurangan rugi-rugi terkecil dibagi dengan selisih nilai pengurangan rugi-rugi terbesar dikurangi dengan nilai rugi-rugi terkecil. Namun, metode ini tidak efektif karena untuk mencari indeks harus dilakukan penambahan kapasitor terlebih dahulu, sehingga untuk mendapatkan nilai PLI terkecil harus dilakukan *trial error* yang membutuhkan waktu lama. Pada [23] di gunakan nilai *loss sensitivity* untuk mendapatkan lokasi optimal pemasangan kapasitor. Nilai *loss sensitivity* merupakan nilai turunan parsial antara rugi-rugi daya aktif terhadap daya reaktif yang dapat dituliskan kedalam persamaan (2.46) berikut

$$\frac{\partial P_L(m)}{\partial P_j} = \frac{2Q_j * R_{ij}}{V_j^2} \quad (2.46)$$

Sehingga lokasi optimal pemasangan kapasitor dapat ditentukan dengan lebih cepat dan efisien. Dengan mempertimbangkan permasalahan stabilitas tegangan yang dapat terjadi pada sistem distribusi maka penentuan lokasi pemasangan kapasitor dapat dilakukan untuk menaikkan nilai indeks stabilitas tegangan [21-23].

## 2.9 Binary Firefly Algorithm

*Binary firefly algorithm* merupakan pengembangan dari metode algoritma *firefly* [9]. Pengembangan yang dilakukan adalah data masukan dan keluaran berupa data *binary* yaitu “0” dan “1”. Data keluaran pada *Binary Firefly Algorithm* berupa data *binary* sehingga perlu fungsi tambahan yaitu fungsi *sigmoid*. Fungsi *sigmoid* seperti persamaan (2.47).

$$S(x_i) = \frac{1}{1+\exp(-x_i)} \quad (2.47)$$

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{if } S(x_i) > r \\ 0, & - \end{cases} \quad (2.48)$$

*Firefly algorithm* atau algoritma kunang-kunang merupakan algoritma metaheuristik yang terinspirasi dari perilaku berkedip kunang-kunang [47]. Tujuan utama dari perilaku berkedip kunang-kunang adalah untuk menarik kunang-kunang yang lain.

Algoritma kunang-kunang dikembangkan oleh Dr Xin-She Yang di Universitas Cambridge pada tahun 2007. Dr Xin-She Yang merumuskan algoritma kunang-kunang sebagai berikut :

1. Semua kunang-kunang itu *unisex* sehingga suatu kunang-kunang akan tertarik pada kunang-kunang yang lain.
2. Daya tarik kunang-kunang sebanding dengan tingkat kecerahan kunang-kunang. Kunang-kunang dengan tingkat kecerahan yang lebih rendah akan tertarik dan bergerak menuju ke kunang-kunang dengan tingkat kecerahan yang lebih tinggi. Tingkat kecerahan dipengaruhi oleh jarak dan cahaya akibat cuaca.

3. Kecerahan atau intensitas cahaya kunang-kunang ditentukan oleh nilai fungsi tujuan dari masalah yang diberikan. Intensitas cahaya sebanding dengan nilai fungsi tujuan untuk masalah optimalisasi.

### 2.9.1 Keatraktifan *Firefly*

Ada dua hal yang sangat penting dalam *firefly algorithm* yaitu intensitas cahaya dan fungsi keatraktifan. Tingkat keatraktifan kunang-kunang dipengaruhi oleh tingkat intensitas cahaya. Fungsi keatraktifan terlihat pada persamaan (2.49).

$$\beta(r) = \beta_0 * e(-\gamma r^m), \quad (m \geq 1) \quad (2.49)$$

Nilai keatraktifan kunang-kunang ( $\beta$ ) dipengaruhi oleh nilai intensitas cahaya ( $\gamma$ ).

### 2.9.2 Jarak Antar *Firefly*

Jarak antara kunang-kunang  $i$  dan  $j$  pada lokasi  $x$ ,  $x_i$  dan  $x_j$  dapat ditentukan ketika dilakukan peletakan titik dimana kunang-kunang tersebut disebar secara random. Jarak antar kunang-kunang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2.50)$$

Dimana selisih dari koordinat lokasi kunang-kunang  $i$  terhadap kunang-kunang  $j$  merupakan jarak diantara kedua kunang-kunang ( $r_{ij}$ ).

### 2.9.3 Pergerakan *Firefly*

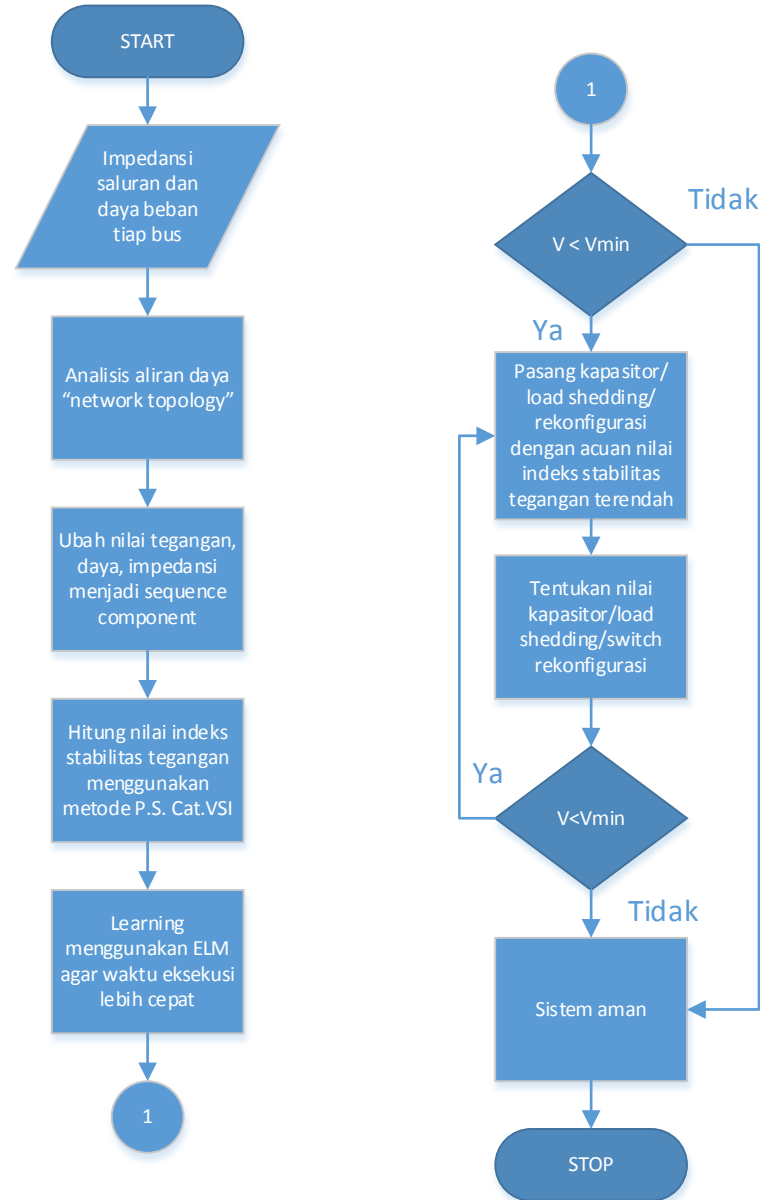
Pergerakan kunang-kunang  $i$  yang bergerak menuju tingkat intensitas cahaya yang terbaik dapat dilihat melalui persamaan (2.51)

$$x_{i\text{baru}} = x_i + \beta_0 * e(-\gamma r_{ij}^2) * (x_i - x_j) + \alpha * (rand - \frac{1}{2}) \quad (2.51)$$

Dimana pergerakan kunang-kunang ( $x_i$  baru) dapat dipengaruhi oleh posisi awal kunang-kunang ( $x_i$ ), tingkat keatraktifan ( $\beta$ ), keadaan cuaca atau lingkungan ( $\gamma$ ) dan jarak antar kunang-kunang ( $x_i - x_j$ ).

*Halaman ini Sengaja Dikosongkan*

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN



**Gambar 3.1.** Diagram alir penelitian.

Alur pengerjaan penelitian **Identifikasi dan Peningkatan Nilai Stabilitas Tegangan pada Sistem Distribusi Tiga Fasa Menggunakan Metode Positive Sequence Catastrophe Theory** telah digambarkan dalam diagram alir diatas.



Adapun langkah-langkah penelitian pada disertasi ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Langkah pertama adalah memasukkan data.

Data yang dimasukkan adalah data beban meliputi daya aktif beban (P) dan daya reaktif beban (Q), konfigurasi jaringan yang menunjukkan hubungan antar bus dan data impedansi jaringan yaitu berupa nilai resistansi (R) dan nilai reaktansi (X). Data Beban, konfigurasi jaringan dan nilai impedansi jaringan distribusi terdapat pada sub 4.1.

2. Lakukan analisis aliran daya [26].

Aliran daya yang digunakan pada disertasi ini menggunakan aliran daya dengan metode *Network Topology* seperti yang terdapat pada persamaan (2.10).

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] \quad (2.10)$$

3. Ubah parameter hasil analisis aliran daya dan data sistem menjadi bentuk *sequence component*.

Luaran analisis aliran daya didapatkan nilai impedansi, daya beban dan tegangan tiap bus. Nilai-nilai tersebut diubah kedalam bentuk *sequence component* menggunakan operator “a” seperti yang terdapat pada persamaan (2.35) dan (2.37).

4. Hitung nilai indeks stabilitas tegangan menggunakan metode usulan.

Metode yang diusulkan adalah *Positive Sequence Catastrophe Theory VSI* (P.S Cat VSI). Penjelasan metode usulan ini dijelaskan pada sub 3.2.1. Setelah mendapatkan nilai indeks stabilitas tegangan pada tiap bus, nilai P.S Cat VSI terendah merupakan nilai bus terlemah pada sistem distribusi tersebut.

5. Running ELM untuk mempercepat proses perhitungan

Untuk meningkatkan kecepatan proses metode P.S Cat VSI, digunakan metode ELM untuk menggantikan pembelajaran rumus P.S Cat VSI sehingga didapatkan waktu eksekusi yang lebih cepat. Detail langkah-langkah ELM yang dilakukan dijabarkan pada poin 3.2.2

6. Lakukan upaya untuk menaikkan nilai indeks stabilitas tegangan

Untuk menaikkan nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain adalah:

- a) Rekonfigurasi Jaringan
- b) Pemasangan Kapasitor
- c) Rekonfigurasi plus pemasangan kapasitor

Detail langkah-langkah tiap poin dijelaskan pada sub 3.1 dibawah.

### **3.1. Metodologi yang diusulkan**

Metode untuk mencari nilai indeks stabilitas tegangan pada sebuah sistem distribusi tiga fasa yang tidak seimbang adalah menggunakan *Positive Sequence Catastrophe Theory*. Metode usulan ini dimodifikasi dari metode *Positive Sequence Catastrophe Theory* untuk sistem satu fasa. Dengan memasukkan nilai *Positive Sequence* dari masing-masing parameter dalam rumus indeks stabilitas tegangan metode *Catastrophe Theory* metode tersebut dapat digunakan untuk mencari nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi tiga fasa [24].

Untuk mendapatkan waktu perhitungan nilai indeks stabilitas tegangan maka metode P.S Cat VSI menjadi input metode ELM. Sehingga dengan proses ini didapatkan waktu perhitungan nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem tiga fasa menjadi lebih singkat [25].

Untuk meningkatkan nilai indeks stabilitas tegangan dapat dilakukan dengan beberapa cara antara lain pelepasan beban [27], rekonfigurasi jaringan [28], dan penambahan kapasitor [40]. Ketiga tahapan ini dilakukan pada sistem distribusi radial yang dianggap seimbang karena menyesuaikan dengan kondisi lapangan dimana peralatan pengaman/pelepas beban langsung melepas ketiga fasa, *switch* yang membuka dan menutup langsung ketiga fasa dan kapasitor yang nilai kapasitansi tiap fasa sama.

Rekonfigurasi dilakukan dengan mengatur status kerja dari *switch* untuk mengubah konfigurasi jaringan. Teknik rekonfigurasi untuk sistem distribusi seimbang maupun tidak seimbang telah dikembangkan pada [12-14] untuk menaikkan nilai indeks stabilitas tegangan. Sedangkan penambahan kapasitor merupakan salah satu usaha yang dapat dilakukan untuk mengkompensasi daya reaktif sehingga nilai rugi-rugi jaringan turun dan juga dapat mengakibatkan nilai stabilitas tegangan akan naik [20-23]. Kemudian dilakukan gabungan antara

rekonfigurasi jaringan dengan penambahan kapasitor yang dilakukan secara bersamaan atau simultan.

### 3.1.1 *Positive Sequence Catastrophe Theory VSI [24]*

Nilai indeks stabilitas tegangan menggunakan metode *Positive Sequence Catastrophe Theory* dapat dicari dengan melakukan substitusi setiap komponen dalam persamaan (2.29) dengan nilai komponen urutan positif pada persamaan (2.34) dan (2.39). Sehingga persamaannya (2.29) menjadi:

$$Cat\_VSI^+(2) = (P_{(m2)}^+ R_{(ij)}^+ + Q_{(m2)}^+ X_{(ij)}^+ - 0.5 |V_{(m1)}^+|^2)^2 - Z_{(ij)}^{+2} (P_{(m2)}^{+2} + Q_{(m2)}^{+2}) \quad (3.1)$$

Nilai komponen urutan positif digunakan karena merepresentasikan semua fasa dari sebuah sistem distribusi yang tidak seimbang. Sehingga dengan menggunakan komponen urutan positif, tidak diperlukan lagi nilai tiap fasa untuk menentukan nilai stabilitas tegangan tetapi cukup menggunakan nilai urutan positif untuk merepresentasikan nilai stabilitas tegangan pada semua fasa. Dengan menggunakan komponen urutan positif ini maka nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi tidak seimbang dapat diketahui.

Nilai indeks stabilitas tegangan dengan menggunakan metode *positive sequence catastrophe theory* (memiliki kisaran nilai antara 0 sampai 0.25. Nilai indeks 0.25 pada sebuah bus didapatkan jika didalam sebuah bus tidak memiliki beban dan nilai tegangan adalah 1 p.u. [8]. Semakin mendekati nol nilai indeks stabilitas tegangan sebuah bus maka semakin mendekati ketidakstabilan sebuah bus tersebut. Bus yang memiliki nilai indeks stabilitas tegangan terendah dalam sebuah sistem menunjukkan bahwa bus tersebut merupakan bus terlemah. Bus terlemah adalah bus yang paling sensitif terhadap perubahan beban, artinya Apabila terjadi sedikit perubahan beban maka bus tersebut akan memiliki deviasi tegangan terbesar jika dibandingkan dengan bus lainnya.

### 3.1.2 *Extreme Learning Machine Based Catastrophe Theory VSI [25]*

Untuk meningkatkan kecepatan identifikasi nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem yang tidak seimbang, digunakan metode ELM untuk mempercepat

waktu eksekusi program sehingga waktu yang diperlukan untuk mendapatkan nilai indeks stabilitas tegangan menjadi lebih cepat.

Metode ELM ini merupakan salah satu jenis variasi dari metode NN [20] . Oleh karena itu diperlukan data sebanyak mungkin untuk proses pembelajaran ELM. Data yang digunakan untuk metode ELM [25] ini dibagi menjadi dua jenis data yaitu data input dan data output. Data input ELM yang digunakan dalam penelitian ini ada dua yaitu data tegangan dan data pembebanan tiap bus. Sedangkan data output ELM yang digunakan adalah nilai indeks stabilitas tegangan menggunakan metode P.S. Cat VSI.

Untuk menguji performa ELM, akan digunakan metode NN sebagai pembandingnya. Selain itu didalam simulasi yang akan dilakukan pada bab 4 digunakan MAPE dengan membandingkan nilai hasil ELM dengan data aktual.

Untuk mengukur kinerja dari metode yang digunakan dapat digunakan *Mean Absolut Percentage Error* (MAPE) yang dirumuskan sebagai berikut.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_{prediksi} - Y_{target}}{Y_{target}} \right| 100\% \quad (3.2)$$

Dengan:

$Y_{prediksi}$  = Nilai prediksi

$Y_{target}$  = Nilai aktual

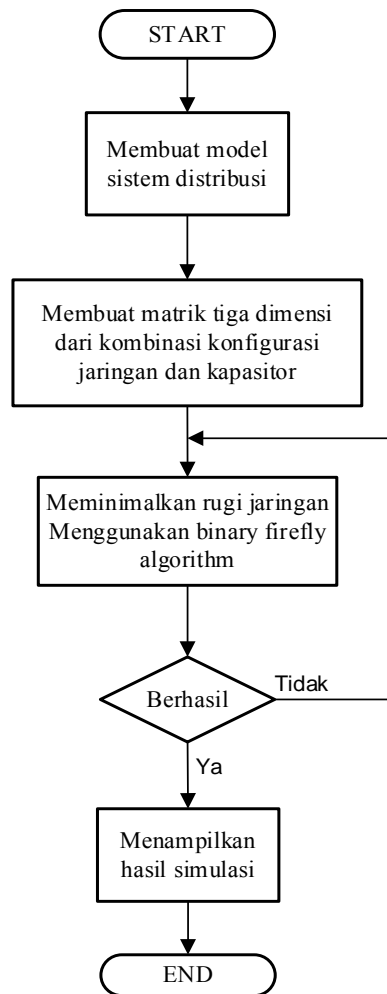
n = jumlah data yang digunakan

Apabila hasil dari MAPE mendekati nol, maka kinerja yang dihasilkan akan semakin baik.

### 3.2. Peningkatan Nilai Indeks Stabilitas Tegangan

Untuk meningkatkan nilai indeks stabilitas tegangan dilakukan dengan dua cara yaitu melakukan rekonfigurasi jaringan dan pemasangan kapasitor. Ketiga tahapan ini dilakukan pada sistem distribusi radial yang dianggap seimbang karena menyesuaikan dengan kondisi lapangan dimana peralatan *switch* yang membuka dan menutup langsung ketiga fasa dan kapasitor yang nilai kapasitansi tiap fasa sama.

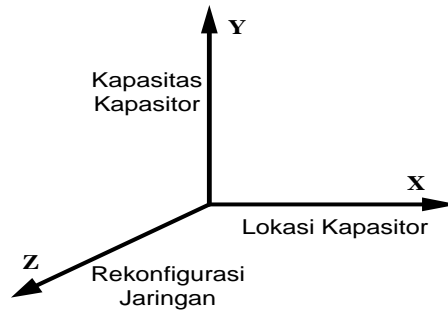
### 3.2.1 Rekonfigurasi Jaringan dan Penambahan Kapasitor



**Gambar 3.2** Diagram alir rekonfigurasi jaringan dan penambahan kapasitor

Untuk menyelesaikan permasalahan rekonfigurasi jaringan biasa digunakan metode analitis seperti metode [12], [13] dan [14]. Namun seiring perkembangan metode *artificial intelligent* (AI), banyak permasalahan optimisasi mulai diselesaikan menggunakan metode AI. Permasalahan rekonfigurasi jaringan merupakan salah satu permasalahan yang dapat diselesaikan menggunakan metode AI [41], [42], [28] dan [43].

Langkah – langkah rekonfigurasi jaringan dan penambahan kapasitor dijelaskan pada gambar 3.2. Berdasarkan gambar tersebut diketahui bahwa proses untuk menaikkan nilai indek stabilitas tegangan dimulai dengan melakukan pemodelan sistem distribusi sampai dengan menampilkan hasil simulasi.



**Gambar 3.3** Dasar pembuatan matrik tiga dimensi

Pemodelan sistem distribusi yang digunakan adalah sistem IEEE 33 bus. Tahapan setelah mendapatkan pemodelan sistem distribusi adalah membuat matrik tiga dimensi. Matrik tiga dimensi ini terdiri dari nilai rekonfigurasi jaringan, lokasi kapasitor dan kapasitas kapasitor. Nilai rekonfigurasi jaringan dibatasi oleh jumlah *tie switch* yang ada pada jaringan distribusi. Lokasi penempatan kapasitor berdasarkan pada jumlah bus pada sistem distribusi. Nilai kapasitas kapasitor dibatasi oleh nilai faktor daya dan daya beban pada jaringan distribusi.

Tahapan setelah mendapatkan matrik tiga dimensi adalah melakukan optimalisasi kombinasi rekonfigurasi jaringan dan kapasitor. Kombinasi rekonfigurasi jaringan dan kapasitor dioptimalkan secara simultan. Optimisasi kombinasi ini menggunakan *Binary Firefly Algorithm*.

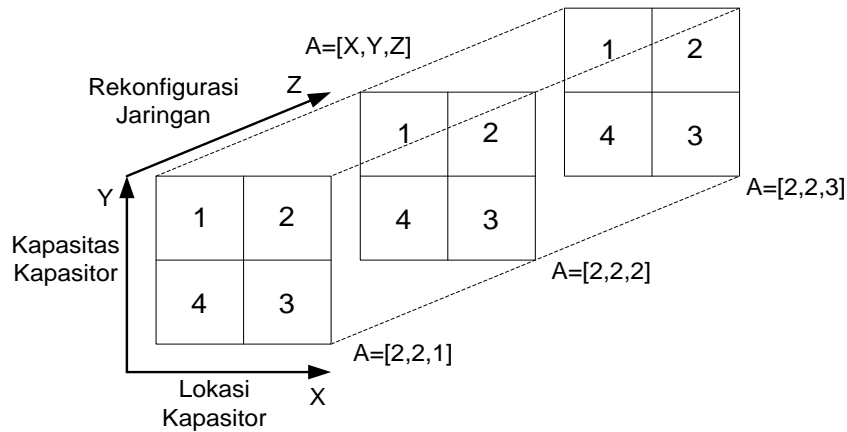
### 3.2.2 Merancang Matrik Tiga Dimensi

Matrik tiga dimensi terdiri dari nilai rekonfigurasi jaringan, lokasi kapasitor dan kapasitas kapasitor. Nilai rekonfigurasi jaringan dibatasi oleh jumlah *tie switch* yang ada pada jaringan distribusi. Lokasi penempatan kapasitor berdasarkan pada jumlah bus pada jaringan distribusi. Nilai kapasitas kapasitor dibatasi oleh nilai faktor daya dan daya beban pada jaringan distribusi.

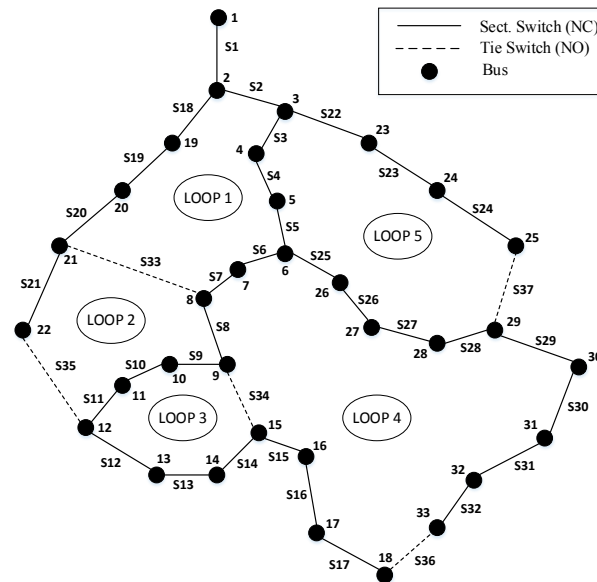
Dasar pembuatan matrik tiga dimensi seperti pada gambar 3.3.

Terdapat tiga sumbu koordinat pada gambar 3.3. Sumbu X menunjukkan lokasi kapasitor. Sumbu Y menunjukkan kapasitas kapasitor. Sumbu Z menunjukkan rekonfigurasi jaringan. Berdasarkan gambar 3.8 dapat dibuat matrik tiga dimensi. Misal matrik tersebut adalah matrik  $A = [X, Y, Z]$ .

Contoh matrik tiga dimensi seperti pada gambar 3.4.



**Gambar 3.4** Matrik tiga dimensi kombinasi rekonfigurasi dan kapasitor



**Gambar 3.5** Contoh sistem IEEE 33 bus dengan loop numbers

Gambar 3.4 merupakan matrik tiga dimensi yang merupakan hasil kombinasi dari rekonfigurasi jaringan dan kapasitor. Dimana untuk sumbu x adalah untuk lokasi kapasitor, sumbu y kapasitas kapasitor dan sumbu z adalah rekonfigurasi jaringan.

### 3.2.3 Rekonfigurasi Jaringan

Konfigurasi sistem akan menjadi *loop* jika salah satu *tie switch* dalam keadaan *closed*. Maka untuk menjaga konfigurasi jaringan tetap radial harus membuka salah satu *sectionalizing switch* sehingga sistem dipertahankan radial. Sehingga jumlah *tie switch* yang ditutup harus sama dengan jumlah *sectionalizing switch* yang dibuka.

**Tabel 3.1** Kelompok Kombinasi *Switch OFF*

Loop	Switch OFF
1	2, 3, 4, 5, 6, 7, 18, 19, 20, 33
2	8, 9, 10, 11, 21, 35
3	12, 13, 14, 34
4	15, 16, 17, 29, 30, 31, 32, 36
5	22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 37

**Tabel 3.2** Data *Binary* Untuk Lokasi Penempatan Kapasitor

Bus	Binary					
2	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	1	1
5	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	1	0	1
7	0	0	0	1	1	0
8	0	0	0	1	1	1
9	0	0	1	0	0	0
10	0	0	1	0	0	1
11	0	0	1	0	1	0
12	0	0	1	0	1	1
13	0	0	1	1	0	0
14	0	0	1	1	0	1
15	0	0	1	1	1	0
16	0	0	1	1	1	1
17	0	1	0	0	0	0
18	0	1	0	0	0	1
19	0	1	0	0	1	0
20	0	1	0	0	1	1
21	0	1	0	1	0	0
22	0	1	0	1	0	1
23	0	1	0	1	1	0
24	0	1	0	1	1	1
25	0	1	1	0	0	0
26	0	1	1	0	0	1
27	0	1	1	0	1	0
28	0	1	1	0	1	1
29	0	1	1	1	0	0
30	0	1	1	1	0	1
31	0	1	1	1	1	0
32	0	1	1	1	1	1
33	1	0	0	0	0	0

Contoh sistem IEEE 33 bus dengan *loop numbers* dijelaskan seperti pada gambar 3.5.



**Tabel 3.3** Data *Binary* Untuk Kapasitas Kapasitor

Daya (kVAR)	Binary					
150	0	0	0	0	0	1
350	0	0	0	0	1	0
450	0	0	0	0	1	1
600	0	0	0	1	0	0
800	0	0	0	1	0	1
900	0	0	0	1	1	0
1050	0	0	0	1	1	1
1200	0	0	1	0	0	0
1350	0	0	1	0	0	1
1500	0	0	1	0	1	0
1650	0	0	1	0	1	1
1800	0	0	1	1	0	0
1950	0	0	1	1	0	1
2100	0	0	1	1	1	0

Gambar 3.5 menjelaskan bahwa sistem IEEE 33 bus dapat dikelompokkan menjadi 5 *loop*. Hal ini dikarenakan pada sistem IEEE 33 bus terdapat 5 buah *tie switch*. Jumlah *loop* sama dengan jumlah *tie switch* yang ada pada sistem.

Semua kemungkinan *tie switch* yang ditutup dengan *sectionalizing switch* yang dibuka dikelompokkan menjadi 5 keompok. Kombinasi *switch* dikelompokkan seperti pada table 3.1. Masing – masing *loop* dipilih salah satu *switch* sehingga ada 5 buah *switch* yang dalam keadaan *OFF*. Kombinasi *switch* terdiri dari 5 buah *switch* yang dalam keadaan *OFF*. Kombinasi *switch* ini yang menjadi masukan pada metode *Binary Firefly Algorithm*. *Binary* memiliki 2 input yaitu kondisi “1” dan “0”. Kondisi “1” menunjukkan bahwa *switch* dalam keadaan *ON*. Kondisi “0” menunjukkan *switch* dalam keadaan *OFF*. Dalam simulasi rekonfigurasi yang dilakukan tanpa melihat batas minimum tegangan. Yang dilihat adalah nilai rata-rata tegangan harus diatas 0.95 pu.

### 3.3. Penambahan Kapasitor

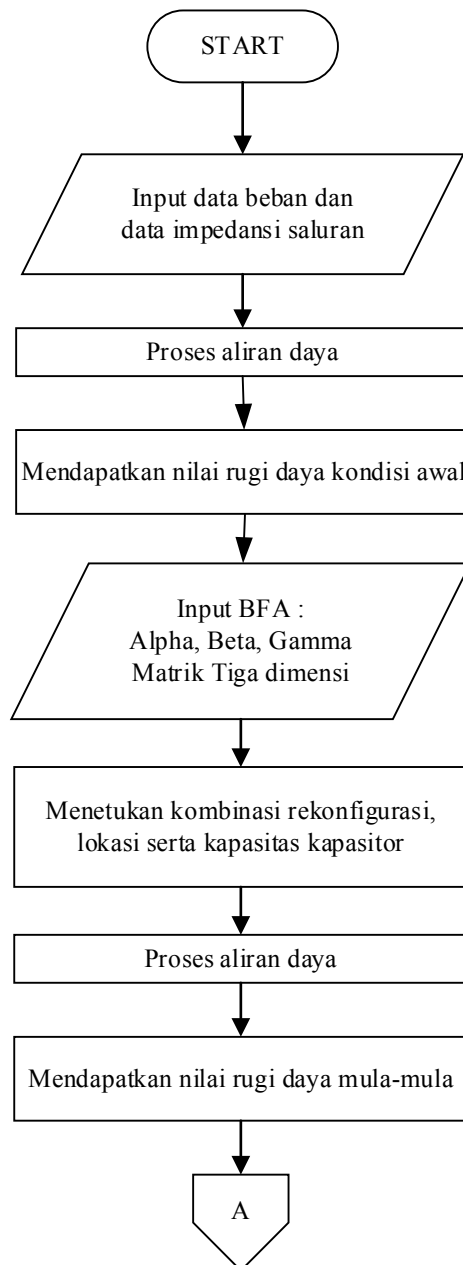
Penelitian ini mengoptimalkan lokasi serta ukuran dari kapasitor. Lokasi penempatan kapasitor berdasarkan pada jumlah bus pada jaringan distribusi. Jumlah kapasitas kapasitor mulai dari 150 kVAR sampai 2100 kVAR sesuai dengan tabel 3.3. Kombinasi dari lokasi dan kapasitas kapasitor menjadi masukan pada

*binary firefly algorithm*. Lokasi dan kapasitas kapasitor diubah kedalam bentuk *binary*. Masukan data *binary* untuk lokasi kapasitor dijelaskan pada tabel 3.3.

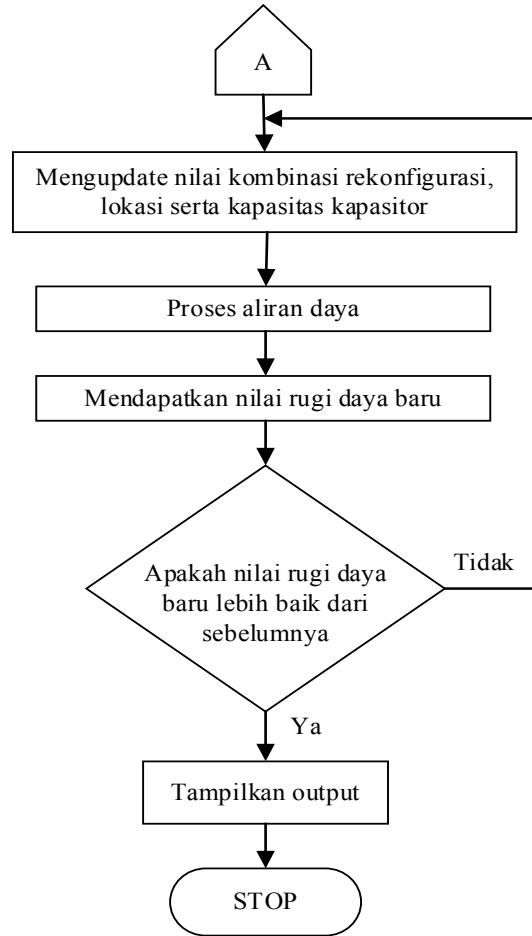
Dari tabel 4.3 diatas dapat dibaca bahwa untuk kapasitor dengan daya 150 kVAR dikodekan dengan kode biner [0 0 0 0 0 1] begitu seterusnya sampai kapasitas 2100 kVAR.

### **3.4. Penerapan *Binary Firefly Algorithm***

Perancangan program simulasi optimasi ini menggunakan *software* MATLAB dengan metode *Binary Firefly Algorithm*. Program simulasi ini dirancang dalam 3 tahap utama yaitu tahap pertama menentukan kondisi awal sistem, tahap kedua optimasi nilai rekonfigurasi dan kapasitor, dan tahap ketiga menampilkan kondisi setelah hasil optimal didapatkan. Prosedur penerapan *Binary Firefly Algorithm* dapat dilihat pada diagram alir dalam Gambar 3.6.



**Gambar 3.6** *Flowchart* penerapan *binary firefly algorithm*



**Gambar 3.6.** Flowchart penerapan *binary firefly algorithm* (Lanjutan)

### 3.5 Fungsi Objektif

Fungsi objektif adalah sebuah fungsi yang digunakan untuk mendapatkan hasil yang optimal dalam suatu optimasi aliran daya. Fungsi Objektif dalam penelitian ini adalah untuk meminimalkan rugi jaringan. Persamaan fungsi objektif untuk meminimalkan rugi jaringan sesuai dengan persamaan (3.3).

$$\text{Min } F = \min (P_{loss} + (\lambda_V \times S_{CV})) \quad (3.3)$$

Dimana  $P_{loss}$  adalah rugi jaringan dan  $\lambda_V$  adalah penalti faktor.  $S_{CV}$  adalah jumlah dari tegangan yang melanggar batasan tegangan (*Constraint*).

Nilai penalti faktor didapatkan sebagai berikut :

$$\lambda_V = \begin{cases} 0, & \text{jika tidak ada batasan tegangan yang dilanggar} \\ 1, & \text{jika ada batasan tegangan yang dilanggar} \end{cases}$$

### 3.6 Batasan – batasan (*Constraint*)

Batasan – batasan (*Constraint*) adalah persyaratan yang tidak boleh dilanggar dalam membuat suatu optimasi aliran daya. Batasan – batasan ini digunakan untuk membantu mendapatkan suatu hasil yang paling optimal. Jika batasan – batasan ini dilanggar maka hasil yang didapatkan bukan suatu hasil yang optimal. Pada penelitian ini menggunakan batasan – batasan sebagai berikut :

#### 1. *Constraint* Tegangan

*Constraint* tegangan adalah suatu batasan tegangan yang tidak boleh dilanggar. Batasan tegangan pada penelitian ini adalah :

$$0,95 \text{ pu} \leq V \leq 1,05 \text{ pu} \quad (3.4)$$

Dimana batas bawah tegangan adalah 0,95 pu dan batas atas tegangan adalah 1,05 pu. Sehingga tegangan pada sistem distribusi harus berada dalam range  $\pm 5\%$  dari tegangan nominal.

#### 2. *Constraint* total daya kapasitas kapasitor

*Constraint* ini membatasi total daya kapasitas maksimum dari kapasitor yang dipasang pada sistem distribusi. *Constraint* ini mengacu pada persamaan (3.5)

$$\sum_{q \in S_B} Q_q^C \leq 1 \times \sum_{q \in S_B} Q_q^L \quad (3.5)$$

#### 3. *Constraint* faktor daya (*cos phi*)

*Constraint* ini membatasi total daya kapasitas kapasitor yang terpasang pada sistem distribusi. *Constraint* ini mengacu pada persamaan (3.6) dengan nilai *cos phi*

$$\text{Cos phi IEEE 33 bus} > 0,9 \quad (3.6)$$

## BAB IV

### Hasil Simulasi dan Analisis Data

#### 4.1 Plant yang digunakan

**Tabel 4.1.** Data Saluran pada sistem IEEE 15 Bus yang dimodifikasi

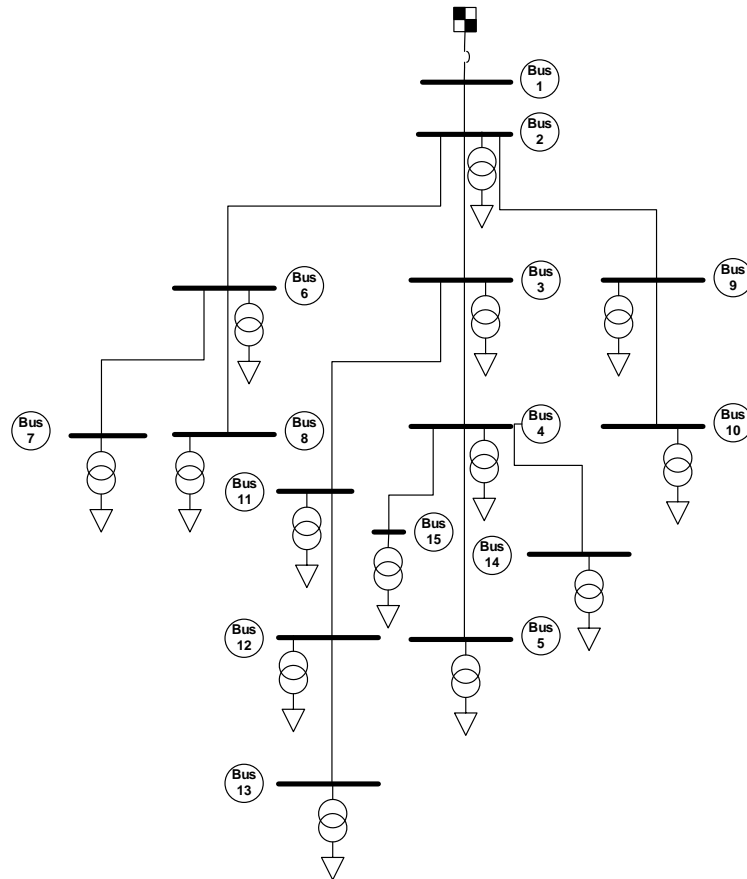
Saluran Distribusi		Impedansi	
Dari Bus	Ke Bus	R (ohm)	X (ohm)
1	2	1.35309	1.32349
2	3	1.17024	1.14464
3	4	0.84111	0.82271
4	5	1.52348	1.0276
2	6	2.55727	1.7249
6	7	1.0882	0.734
6	8	1.25143	0.8441
2	9	2.01317	1.3579
9	10	1.68671	1.1377
3	11	1.79553	1.2111
11	12	2.44845	1.6515
12	13	2.01317	1.3579
4	14	2.23081	1.5047
4	15	1.19702	0.8074

Didalam simulasi digunakan beberapa sistem distribusi radial yaitu antara lain sistem standar IEEE 15 bus dan 33 bus yang dimodifikasi dan sistem distribusi Surabaya Utara 20 kV.

##### 4.1.1 Plant IEEE 15 bus

Sistem IEEE 15 bus merupakan salah satu *test system* yang dapat digunakan untuk melakukan simulasi dan analisis sistem distribusi tenaga listrik. Pada penelitian ini plant IEEE 15 bus digunakan dalam simulasi pengujian metode P.S Cat VSI dalam menentukan nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi tidak seimbang. Dan untuk membandingkan performa metode P.S Cat VSI jika dibandingkan dengan metode yang lainnya dalam menentukan nilai indeks stabilitas tegangan. Data saluran distribusi IEEE 15 bus terdapat di tabel 4.1 diatas.

Saluran distribusi IEEE 15 bus memiliki 14 bus beban dan 1 bus penghubung dengan total pembebanan tiga fasa sebesar 3,6 MW dan 3,75 MVAR seperti yang terdapat pada tabel 4.2 dibawah ini. Gambar SLD sistem IEEE 15 bus terdapat pada gambar 4.1



**Gambar 4.1.** SLD Sistem IEEE 15 Bus

**Tabel 4.2.** Data Beban pada sistem IEEE 15 Bus yang dimodifikasi

No. Bus	P (MW)			Q (MVAR)		
	R-N	S-N	T-N	R-N	S-N	T-N
1	0	0	0	0	0	0
2	0.0441	0.0441	0.0441	0.044991	0.044991	0.044991
3	0.07	0.07	0.07	0.071414	0.071414	0.071414
4	0.14	0.14	0.14	0.142829	0.142829	0.142829
5	0.0441	0.0441	0.0441	0.044991	0.044991	0.044991
6	0.14	0.14	0.14	0.142829	0.142829	0.142829
7	0.14	0.14	0.14	0.142829	0.142829	0.142829
8	0.07	0.07	0.07	0.071414	0.071414	0.071414
9	0.07	0.07	0.07	0.071414	0.071414	0.071414
10	0.0441	0.0441	0.0441	0.044991	0.044991	0.044991
11	0.14	0.14	0.14	0.142829	0.142829	0.142829
12	0.07	0.07	0.07	0.071414	0.071414	0.071414
13	0.0441	0.0441	0.0441	0.044991	0.044991	0.044991
14	0.07	0.07	0.07	0.071414	0.071414	0.071414
15	0.14	0.14	0.14	0.142829	0.142829	0.142829

Saluran distribusi IEEE 15 bus memiliki 14 bus beban dan 1 bus penghubung dengan total pembebanan tiga fasa sebesar 3,6 MW dan 3,75 MVAR seperti yang terdapat pada tabel 4.2 diatas

#### 4.1.2 Plant Surabaya Utara 20 kV Penyulang Basuki Rahmat

**Tabel 4.3.** Kondisi Pembebanan pada Penyulang Basuki Rahmat

No. Bus	Loading					
	P (MW)			Q (MVAR)		
	R-N	S-N	T-N	R-N	S-N	T-N
1						
2	0	0	0	0	0	0
3	0.571	0.512	0.593	0.143	0.104	0.092
4	0.059	0.053	0.062	0.008	0.011	0.009
5	0.077	0.072	0.082	0.016	0.018	0.017
6	0	0	0	0	0	0
7	0.666	0.678	0.696	0.095	0.137	0.175
8	1.188	1.2	1.218	0.169	0.171	0.173
9	0.13	0.131	0.134	0.026	0.033	0.035
10	0.053	0.173	0.1	0.019	0.088	0.043
11	0	0	0	0	0	0
12	0.054	0.062	0.035	0.011	0.009	0.007
13	0.906	0.918	0.9	0.227	0.23	0.226
14	0	0	0	0	0	0
15	0.013	0.026	0.034	0.002	0.004	0.014
16	0	0	0	0	0	0
17	0.624	0.636	0.642	0.089	0.185	0.187
18	0	0	0	0	0	0
19	0.134	0.15	0.119	0.034	0.044	0.017
20	0.208	0.223	0.213	0.029	0.065	0.062
21	0.171	0.166	0.157	0.056	0.237	0.04
22	0.299	0.257	0.313	0.043	0.109	0.143
23	0.259	0.259	0.256	0.053	0.094	0.037
24	0.154	0.161	0.151	0.022	0.047	0.022
25	0.178	0.202	0.199	0.025	0.059	0.058
26	0.175	0.199	0.177	0.025	0.04	0.044
27	0.059	0.086	0.095	0.008	0.012	0.014
28	0.07	0.08	0.076	0.017	0.028	0.019
29	0.205	0.259	0.116	0.029	0.037	0.029

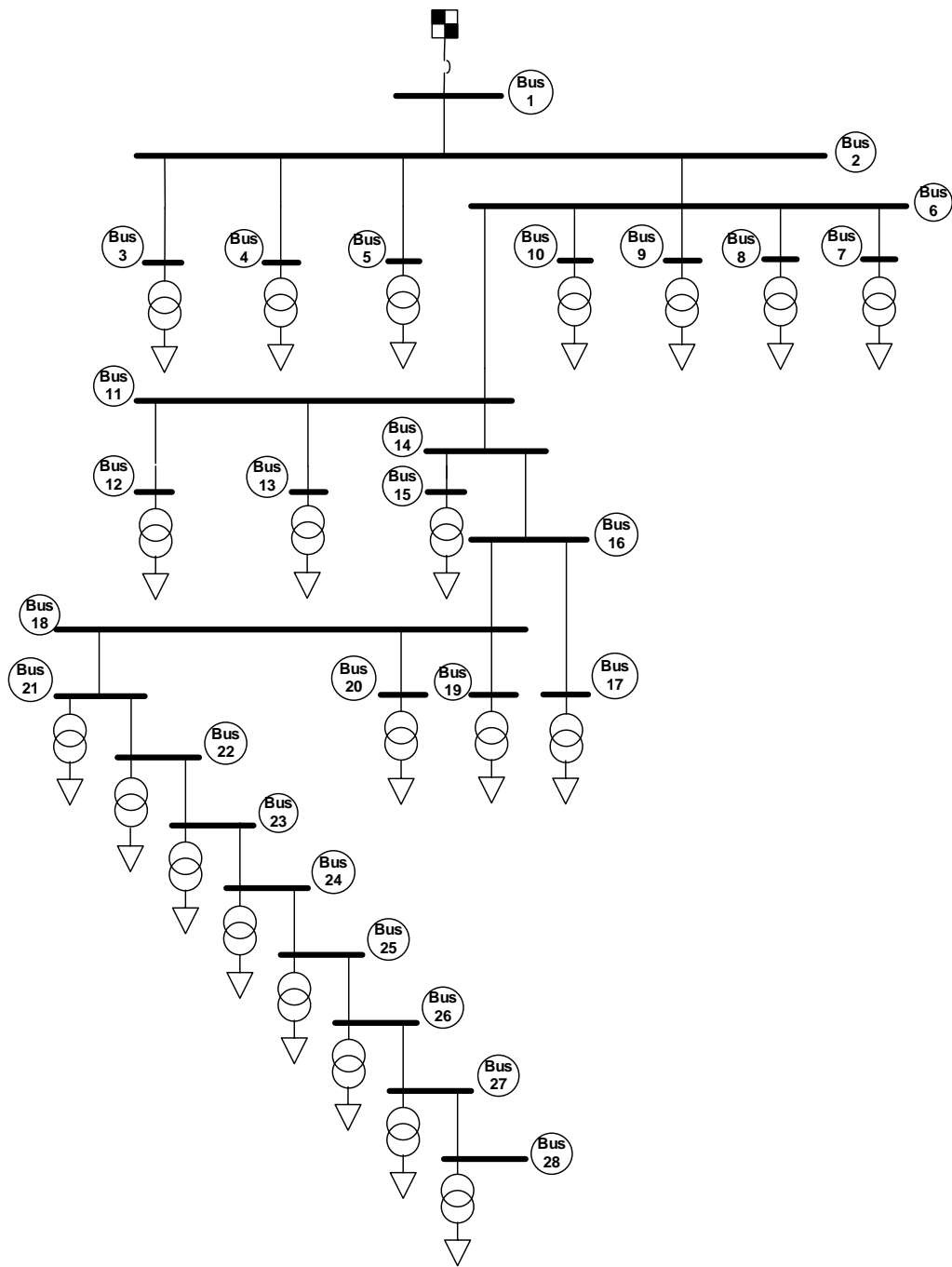
Penyulang Basuki Rahmat merupakan bagian dari sistem distribusi Surabaya Utara 20 kV. Penyulang Basuki Rahmat ini digunakan untuk simulasi performansi dari metode P.S Cat VSI jika dibandingkan dengan metode lain dan digunakan untuk membandingkan penggunaan komponen urutan positif dan negatif dalam menentukan nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi radial tidak seimbang. Data pembebanan pada penyulang Basuki Rahmat dapat dilihat pada tabel 4.3 diatas. Pada penyulang Basuki Rahmat terdiri dari 23 bus beban dengan total beban sebesar 19.12 MW dan 4.37 MVAR. Sedangkan data impedansi penyulang Basuki Rahmat terdapat pada tabel berikut. Nilai impedansi pada tabel 4.3 diatas merupakan nilai impedansi tiap fasa yang dimiliki oleh penyulang Basuki Rahmat.



**Tabel 4.4.** Data Impedansi Penyulang Basuki Rahmat

Distribution Line		Impedance		Length (m)
From Bus	To Bus	R (ohm)	X (ohm)	
1	2	0.1489	0.0731	562
2	3	0.026	0.013	100
2	4	0.0066	0.0033	25
2	5	0.0062	0.0031	23.5
2	6	0.0265	0.013	100
6	7	0.01325	0.0065	50
6	8	0.01325	0.0065	50
6	9	0.01325	0.0065	50
6	10	0.01325	0.0065	50
6	11	0.0265	0.013	100
11	12	0.01325	0.0065	50
11	13	0.01325	0.0065	50
11	14	0.0795	0.039	300
14	15	0.01325	0.0065	50
14	16	0.03445	0.0169	130
16	17	0.01325	0.0065	50
16	18	0.01669	0.0082	63
18	19	0.01325	0.0065	50
18	20	0.01325	0.0065	50
18	21	0.0265	0.013	100
21	22	0.03111	0.0153	117.38
22	23	0.00663	0.0033	25
23	24	0.01378	0.0068	52
24	25	0.0265	0.013	100
25	26	0.00658	0.0039	31.17
26	27	0.01157	0.0069	54.84
27	28	0.01191	0.0058	44.93
18	29	0.0265	0.013	100

Detail SLD Sistem Distribusi Surabaya 20 kV Basuki Rahmat terdapat pada gambar 4.2 dibawah ini



**Gambar 4.2.** SLD Sistem Distribusi Surabaya Utara 20 kV Penyulang Basuki Rahmat

#### 4.1.3 Plant IEEE 33 Bus

**Tabel 4.5.** Data Beban pada sistem IEEE 33 Bus yang dimodifikasi

No. Bus	R		S		T	
	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
2	0.1	0.06	0.1	0.06	0.1	0.06
3	0.09	0.04	0.09	0.04	0.09	0.04
4	0.12	0.08	0.12	0.08	0.12	0.08
5	0.06	0.03	0.06	0.03	0.06	0.03
6	0.06	0.02	0.06	0.02	0.06	0.02
7	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
8	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
9	0.06	0.02	0.06	0.02	0.06	0.02
10	0.06	0.02	0.06	0.02	0.06	0.02
11	0.045	0.03	0.045	0.03	0.045	0.03
12	0.06	0.035	0.06	0.035	0.06	0.035
13	0.06	0.035	0.06	0.035	0.06	0.035
14	0.12	0.08	0.12	0.08	0.12	0.08
15	0.06	0.01	0.06	0.01	0.06	0.01
16	0.06	0.02	0.06	0.02	0.06	0.02
17	0.06	0.02	0.06	0.02	0.06	0.02
18	0.09	0.04	0.09	0.04	0.09	0.04
19	0.09	0.04	0.09	0.04	0.09	0.04
20	0.09	0.04	0.09	0.04	0.09	0.04
21	0.09	0.04	0.09	0.04	0.09	0.04
22	0.09	0.04	0.09	0.04	0.09	0.04
23	0.09	0.05	0.09	0.05	0.09	0.05
24	0.42	0.2	0.42	0.2	0.42	0.2
25	0.42	0.2	0.42	0.2	0.42	0.2
26	0.06	0.025	0.06	0.025	0.06	0.025
27	0.06	0.025	0.06	0.025	0.06	0.025
28	0.06	0.02	0.06	0.02	0.06	0.02
29	0.12	0.07	0.12	0.07	0.12	0.07
30	0.2	0.6	0.2	0.6	0.2	0.6
31	0.15	0.07	0.15	0.07	0.15	0.07
32	0.21	0.1	0.21	0.1	0.21	0.1
33	0.06	0.04	0.06	0.04	0.06	0.04

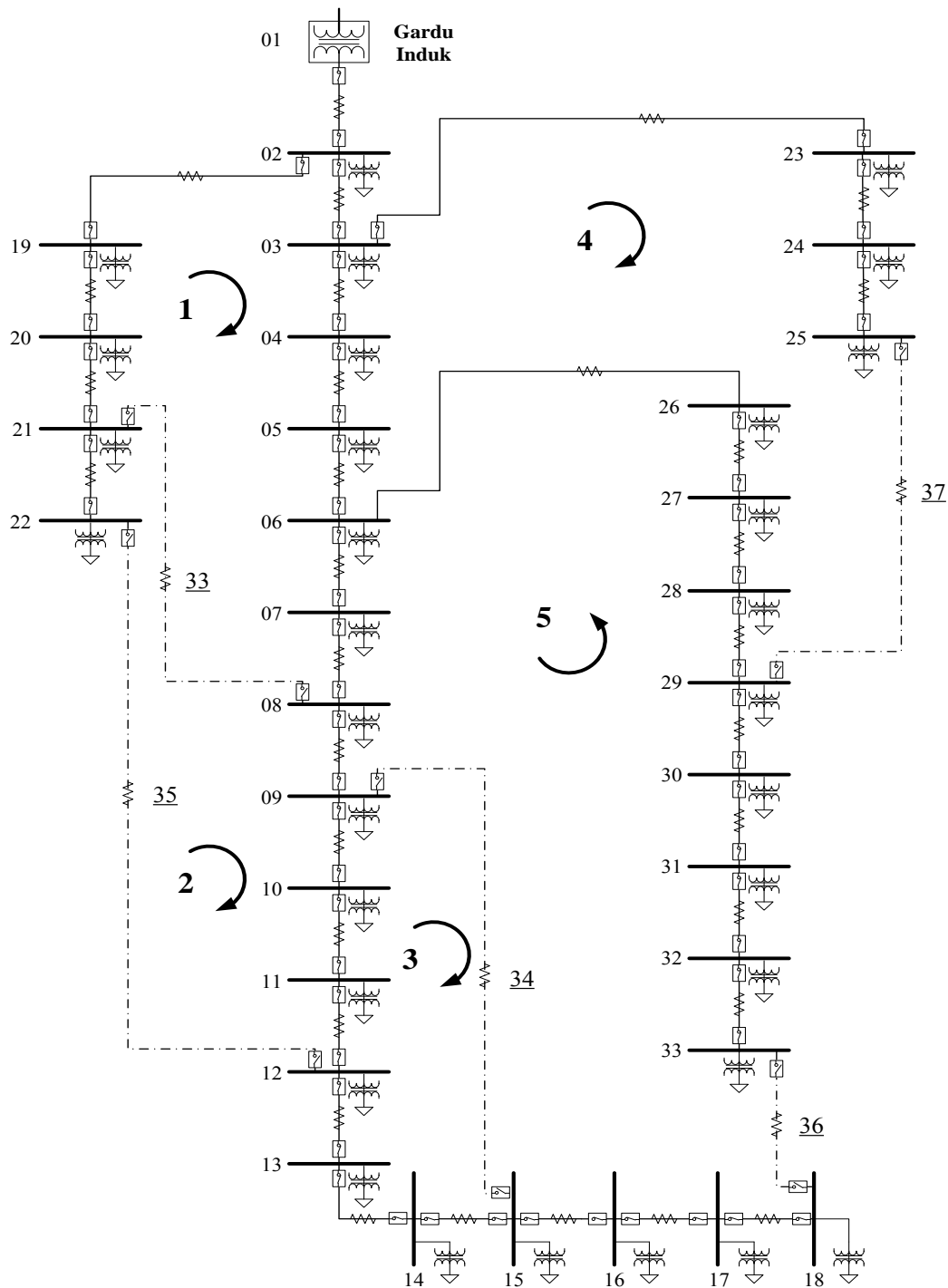
Plant IEEE 33 Bus yang digunakan didalam simulasi merupakan data IEEE 33 bus yang telah dimodifikasi dari sistem 1 fasa menjadi 3 fasa seimbang. Plant IEEE 33 Bus ini digunakan dalam simulasi tindakan peningkatan nilai indeks stabilitas tegangan dengan cara rekonfigurasi jaringan.

Pembebanan tiap fasa sistem IEEE 33 bus yang dimodifikasi didapatkan dari data pembebanan bus pada sistem IEEE 33 bus satu fasa yang diubah menjadi data pembebanan tiap fasa. Detail pembebanan sistem IEEE 33 bus yang dimodifikasi terdapat pada tabel 4.5 diatas.

**Tabel 4.6.** Data impedansi pada sistem IEEE 33 Bus yang dimodifikasi

Dari bus	Ke- bus	R		S		T	
		R (ohm)	X (ohm)	R (ohm)	X (ohm)	R (ohm)	X (ohm)
1	2	0.0922	0.047	0.0922	0.047	0.0922	0.047
2	3	0.493	0.2511	0.493	0.2511	0.493	0.2511
3	4	0.366	0.1864	0.366	0.1864	0.366	0.1864
4	5	0.3811	0.1941	0.3811	0.1941	0.3811	0.1941
5	6	0.819	0.707	0.819	0.707	0.819	0.707
6	7	0.1872	0.6188	0.1872	0.6188	0.1872	0.6188
7	8	0.7144	0.2351	0.7144	0.2351	0.7144	0.2351
8	9	1.03	0.74	1.03	0.74	1.03	0.74
9	10	1.044	0.74	1.044	0.74	1.044	0.74
10	11	0.1966	0.065	0.1966	0.065	0.1966	0.065
11	12	0.3744	0.1238	0.3744	0.1238	0.3744	0.1238
12	13	1.468	1.155	1.468	1.155	1.468	1.155
13	14	0.5416	0.7129	0.5416	0.7129	0.5416	0.7129
14	15	0.591	0.526	0.591	0.526	0.591	0.526
15	16	0.7463	0.545	0.7463	0.545	0.7463	0.545
16	17	1.289	1.721	1.289	1.721	1.289	1.721
17	18	0.732	0.574	0.732	0.574	0.732	0.574
2	19	0.164	0.1565	0.164	0.1565	0.164	0.1565
19	20	1.5042	1.3554	1.5042	1.3554	1.5042	1.3554
20	21	0.4095	0.4784	0.4095	0.4784	0.4095	0.4784
21	22	0.7089	0.9373	0.7089	0.9373	0.7089	0.9373
3	23	0.4512	0.3083	0.4512	0.3083	0.4512	0.3083
23	24	0.898	0.7091	0.898	0.7091	0.898	0.7091
24	25	0.896	0.7011	0.896	0.7011	0.896	0.7011
6	26	0.203	0.1034	0.203	0.1034	0.203	0.1034
26	27	0.2842	0.1447	0.2842	0.1447	0.2842	0.1447
27	28	1.059	0.9337	1.059	0.9337	1.059	0.9337
28	29	0.8042	0.7006	0.8042	0.7006	0.8042	0.7006
29	30	0.5075	0.2585	0.5075	0.2585	0.5075	0.2585
30	31	0.9744	0.963	0.9744	0.963	0.9744	0.963
31	32	0.3105	0.3619	0.3105	0.3619	0.3105	0.3619
32	33	0.341	0.5302	0.341	0.5302	0.341	0.5302

Sistem IEEE 33 bus yang telah dimodifikasi memiliki total jumlah beban sebesar 3.715 M W dan 2.3 MVAR. Detail SLD Sistem IEEE 33 bus yang dimodifikasi terdapat pada gambar 4.3. Sedangkan data impedansi saluran IEEE 33 bus tiap fasa dapat dilihat pada tabel 4.6 atas



**Gambar 4.3.** SLD Sistem IEEE 33 Bus

## 4.2. Validasi Metode

Untuk mengetahui apakah metode usulan sesuai dengan hasil yang diharapkan, digunakan sistem IEEE 15 bus yang dimodifikasi menjadi sistem tiga fasa seimbang.

**Tabel 4.7.** Hasil simulasi pada sistem IEEE 15 Bus yang dimodifikasi

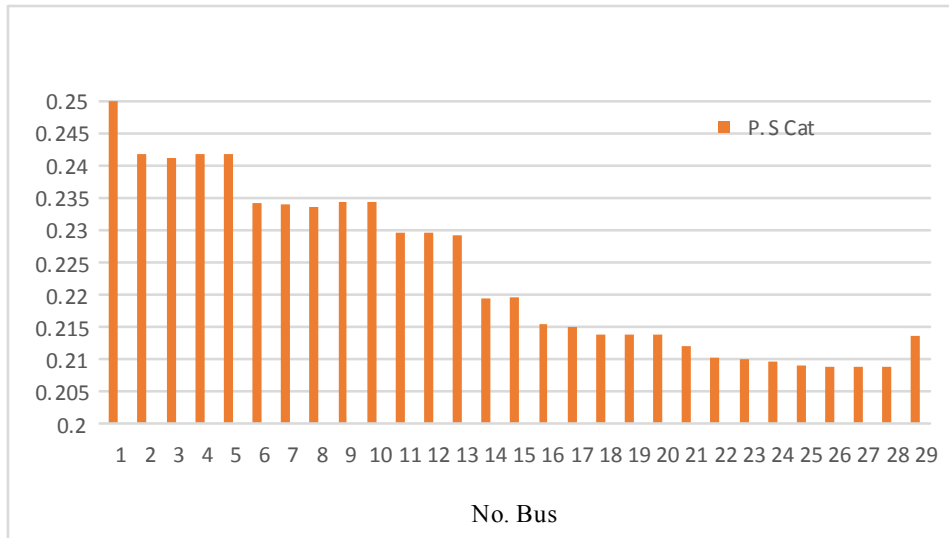
No. Bus	Single Phase VSI [12]	No. Bus	P.S. VRI	No. Bus	P.S. Catastrophe Theory	No. Bus	P.S.VSI
13	0.796	13	0.962	13	0.204	13	0.814
12	0.800	12	0.963	12	0.205	12	0.818
15	0.809	15	0.965	15	0.207	15	0.826
14	0.810	14	0.965	14	0.207	14	0.827
5	0.814	5	0.966	5	0.208	5	0.830
11	0.814	11	0.966	11	0.208	11	0.831
4	0.818	4	0.967	4	0.209	4	0.834
7	0.836	7	0.970	7	0.212	7	0.850
3	0.837	3	0.971	3	0.213	3	0.852
8	0.839	8	0.971	8	0.213	8	0.853
6	0.843	6	0.972	6	0.214	6	0.857
10	0.874	10	0.978	10	0.221	10	0.885
9	0.878	9	0.978	9	0.222	9	0.889
2	0.888	2	0.981	2	0.225	2	0.900
1	1	1	1	1	0.25	1	1

Digunakan metode P.S.VRI dan P.S.VSI untuk membandingkan urutan nilai indeks stabilitas tegangan yang didapatkan oleh masing-masing metode. Metode validasi ini sama seperti yang digunakan [4] dan [8]. Hasil simulasi untuk validasi metode usulan terdapat pada tabel 4.7 diatas.

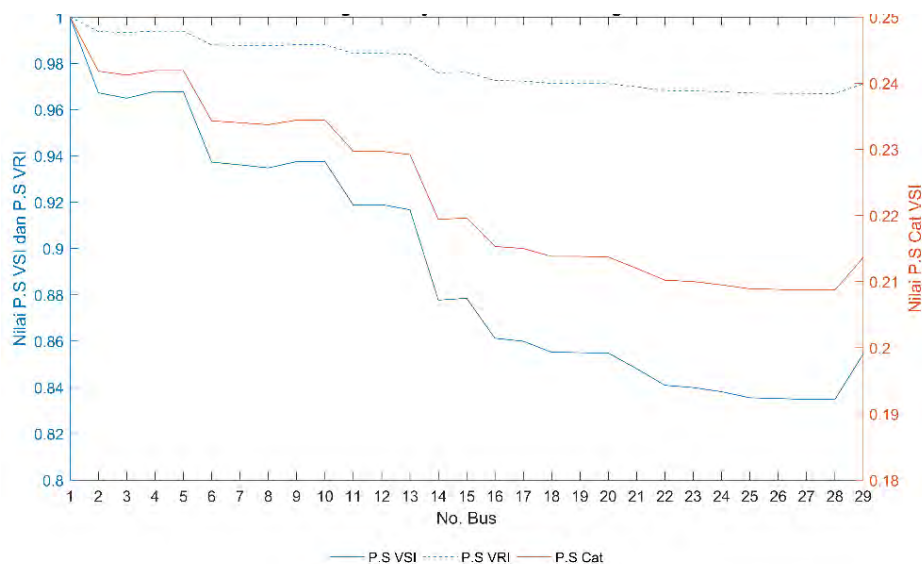
Dari hasil simulasi indeks stabilitas tegangan pada sistem IEEE 15 bus pada tabel diatas, didapatkan bahwa urutan nilai indeks stabilitas tegangan menggunakan metode P.S VSI [4], P.S VRI maupun pada metode *P.S Catastrophe Theory* pada sistem IEEE 15 bus yang dimodifikasi menjadi tiga fasa seimbang memiliki urutan nilai indeks stabilitas tegangan yang sama dengan urutan *single phase*. Dari hasil ini dapat diambil kesimpulan bahwa konsep *positive sequence* dapat diterapkan pada sistem distribusi tiga fasa tidak seimbang untuk menghitung nilai indeks stabilitas tegangan.

#### **4.3 Identifikasi Indeks stabilitas tegangan menggunakan P.S Catastrophe Theory VSI**

Sistem distribusi Surabaya Utara 20 kV Basuki Rahmat dengan total 29 bus akan digunakan untuk mengetahui nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem real sekaligus untuk menguji manakah dari ketiga metode yang unggul untuk menghitung nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem tiga fasa tidak seimbang.



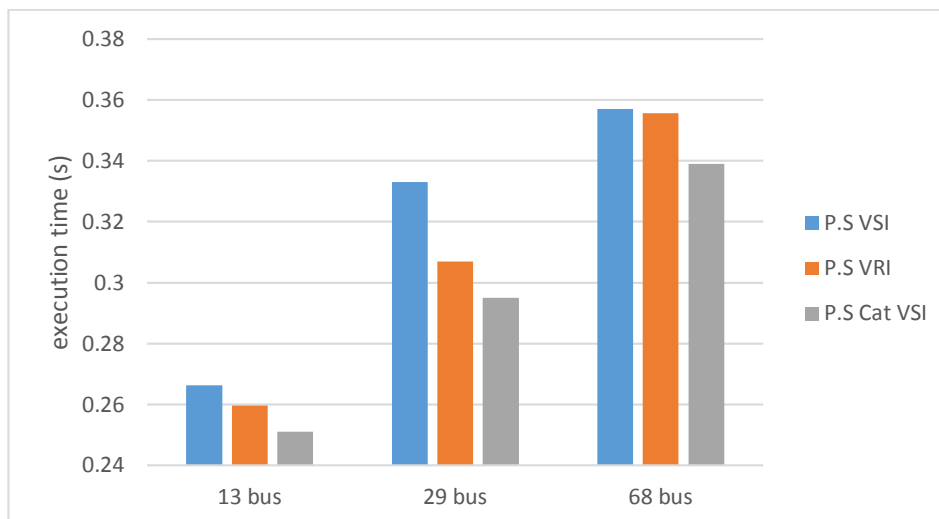
**Gambar 4.4.** Nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem tiga fasa tidak seimbang untuk metode P.S. Cat VSI (metode yang diusulkan)



**Gambar 4.5.** Perbandingan nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem tiga fasa tidak seimbang untuk ketiga metode

Dari hasil simulasi pada penyulang Basuki Rahmat menggunakan metode yang diusulkan, didapatkan nilai bus yang memiliki indeks stabilitas tegangan terendah di bus 28 dengan nilai 0.2087 seperti yang terdapat pada gambar 4.4.

Kemudian dari simulasi metode P.S Cat VSI dibandingkan dengan dua metode lainnya untuk mendapatkan metode terbaik untuk menentukan nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi radial. Hasil running ketiga metode dapat dilihat pada gambar 4.5.



**Gambar 4.6.** Perbandingan waktu eksekusi pada ketiga metode

Dari gambar 4.5 diatas dapat diketahui bahwa ketiga metode memiliki urutan voltage stability index yang sama yaitu bus 28, 27, 26, 25 dan 29 untuk lima bus terlemahnya. Pada metode VRI rasio perubahannya kecil yaitu 1 untuk terkuat dan 0.9667 untuk bus terlemah, atau hanya memiliki range nilai sebesar 0.0333 sehingga akurasi dari metode ini kurang untuk nilai beban yang kecil. Metode P.S VSI dan P.S. CAT VSI Cat memiliki akurasi yang lebih baik, yaitu P.S VSI dengan interval 0.1653 dengan skala 1 dan P.S. CAT VSI dengan interval 0.0413 dengan skala 0.25.

Dari ketiga metode tersebut di ujicoba lagi pada sistem distribusi Surabaya Utara dengan penyulang Mulyosari yang memiliki jumlah bus sebesar 68 bus. Karena untuk sistem yang lebih besar kompleksitasnya lebih besar.

Dari hasil simulasi menggunakan penyulang Mulyosari 68 bus, nilai voltage stability index menggunakan ketiga metode tersebut juga memiliki urutan yang sama yaitu pada bus 63, 62, 61, 60 dan 59 untuk lima bus dengan indeks stabilitas tegangan terlemah. Akan tetapi metode P.S CAT VSI memiliki waktu eksekusi yang lebih cepat jika dibandingkan dengan kedua metode yang lain.

Waktu eksekusi pada penyulang Basuki Rahmat menggunakan metode P.S VSI adalah sebesar 0.333762 detik, 0.306947 detik jika menggunakan metode P.S VRI dan jika menggunakan metode P.S Cat VSI adalah sebesar 0.294397 detik. Waktu eksekusi untuk masing-masing metode diberikan pada gambar 4.6 diatas.



**Tabel 4.8** Rekap nilai indeks stabilitas tegangan berdasar *negative sequence* pada Penyulang Basuki Rahmat

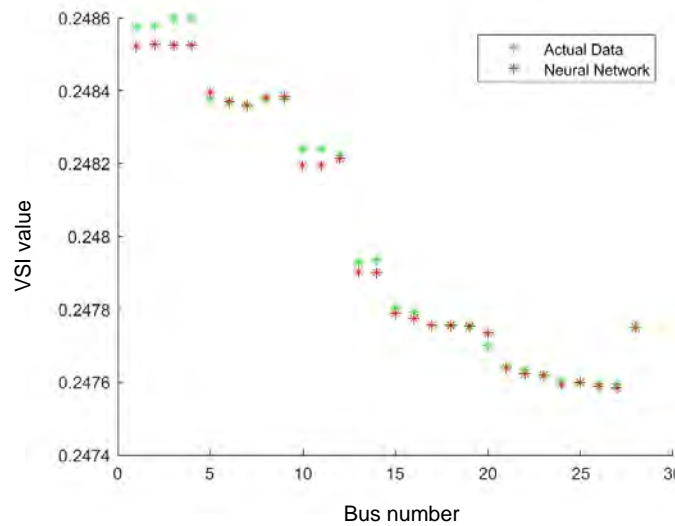
Bus No.	N.S VSI ( $\times 10^{-19}$ )	Bus No.	N.S Cat ( $\times 10^{-19}$ )	Bus No.	N.S VRI
28	0.386272	28	0.096568	28	0.002648
27	0.386349	27	0.096587	27	0.002648
26	0.386503	26	0.096626	26	0.002648
25	0.386675	25	0.096669	25	0.002648
29	0.395402	29	0.09885	29	0.002656
20	0.395587	20	0.098897	20	0.002656
19	0.395683	19	0.098921	19	0.002656
18	0.395784	18	0.098946	18	0.002656
10	0.43386	9	0.108465	9	0.002686
9	0.43386	10	0.108469	10	0.002686
5	0.44785	5	0.11196	5	0.002697
4	0.44786	4	0.11196	4	0.002697

Setelah melakukan *running* simulasi pada tiga sistem yang berbeda, dapat disimpulkan bahwa metode terbaik untuk menghitung nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi radial tiga fasa tidak seimbang adalah menggunakan metode usulan yaitu metode P.S Cat VSI [24].

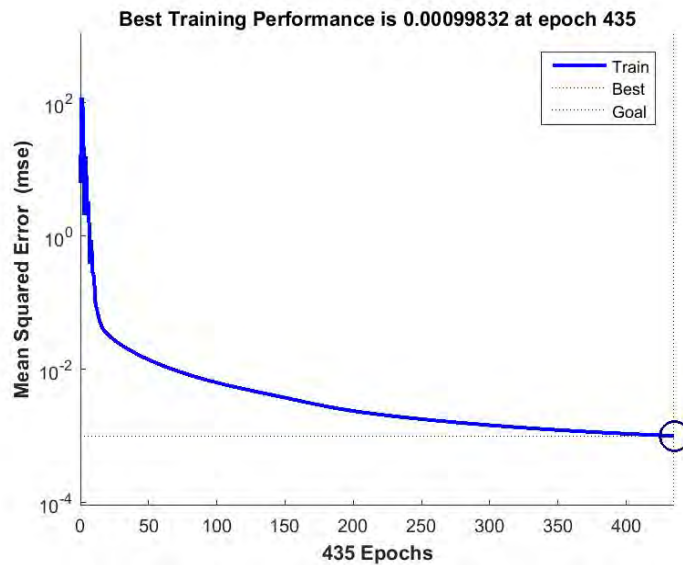
Kemudian untuk meyakinkan hanya metode berdasarkan *positive sequence* yang dapat digunakan untuk menentukan nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi tiga fasa tidak seimbang maka digunakan metode berdasarkan *negative sequence*.

Dari hasil simulasi penentuan nilai indeks stabilitas tegangan berdasarkan *negative sequence* pada sistem distribusi Surabaya Utara penyulang Basuki Rahmat didapatkan untuk beberapa metode nilai indeks stabilitas tegangan sangat kecil, sehingga didapatkan nilai indeks stabilitas tegangan yang sama untuk beberapa bus. Dari tabel 4.8 diatas dapat diketahui untuk metode *negatif sequence* VRI memiliki 8 nilai bus dengan indeks yang sama yaitu 0.002656 dan untuk metode *negatif sequence* VSI terdapat dua nilai bus yang memiliki nilai indeks yang sama yaitu  $0.43386 \times 10^{-19}$  pada bus 10 dan 9. Sedangkan untuk metode *negatif sequence catastrophe theory* pada bus 5 dan 4 memiliki nilai indeks yang sama yaitu  $0.11196 \times 10^{-19}$ . Sehingga dapat disimpulkan bahwa untuk menentukan nilai indeks stabilitas tegangan pada sistem distribusi tiga fasa tidak seimbang hanya dapat dilakukan dengan konsep *positif sequence* [24].

#### 4.4 Identifikasi indeks stabilitas tegangan menggunakan E.L.M Based P.S Catastrophe Theory VSI

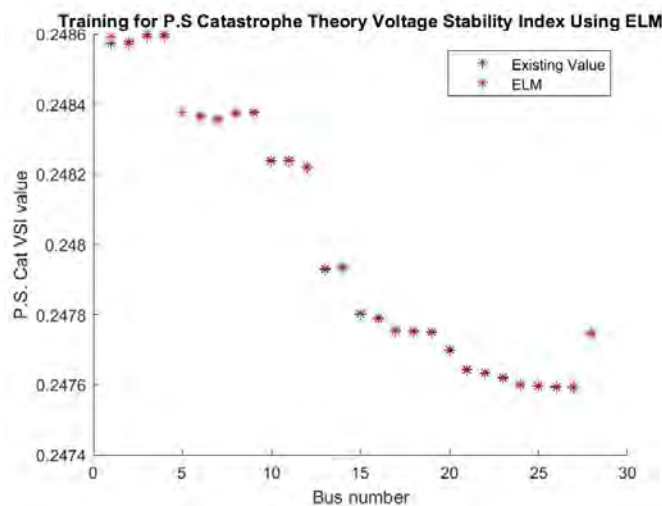


**Gambar 4.7.** Perbandingan hasil training NN dengan data perhitungan sesungguhnya



**Gambar 4.8.** Grafik performansi training NN

Untuk mempercepat waktu eksekusi nilai indeks stabilitas tegangan, digunakan metode ELM yang dibandingkan dengan metode NN yang diaplikasikan pada metode P.S Cat VSI.

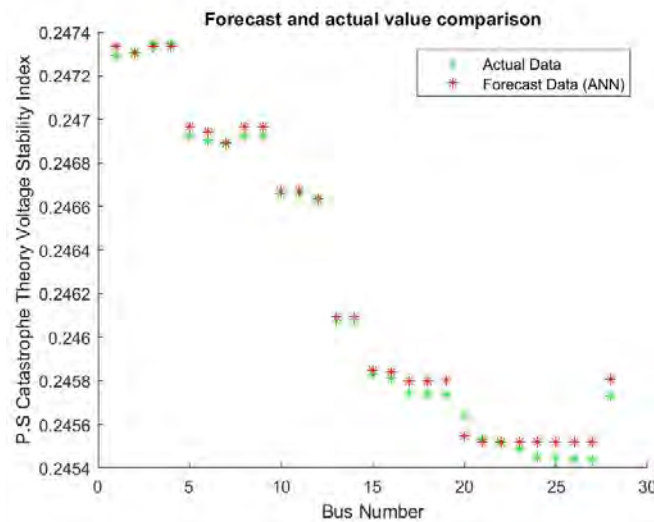


**Gambar 4.9.** Perbandingan hasil training ELM dengan data perhitungan sesungguhnya

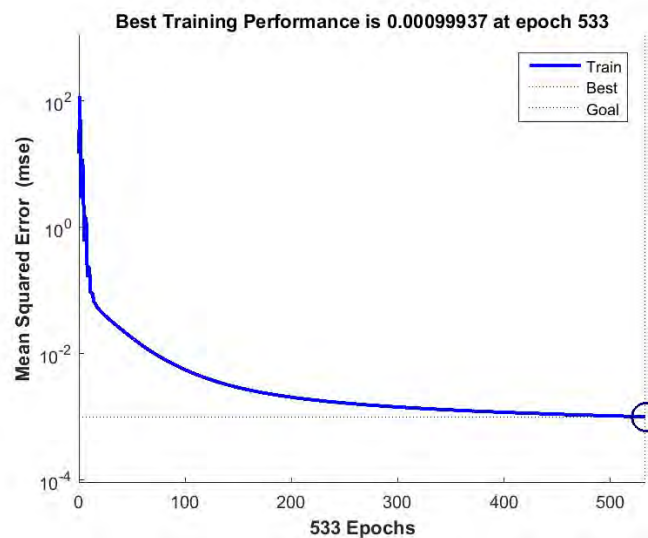
Setting parameter NN dan ELM pada simulasi plant Distribusi Surabaya Utara 20 kV Penyulang Basuki Rahmat yaitu memiliki jumlah *hidden layer* sebanyak 100 buah, jumlah neuron sebesar 50 buah dan memiliki jumlah iterasi sebesar 1000 iterasi. Untuk memperbanyak variasi data pembebanan digunakan data simulasi aliran daya dengan perubahan beban sebesar 5% pada tiap bus mulai dari pembebanan normal sistem sampai dengan penambahan beban sebesar 100% dari beban normal. Sehingga didapatkan jumlah data sebesar 560 buah data pembebanan, dimana 70% data digunakan sebagai *training* dan 30% data digunakan untuk *testing*. Untuk training NN didapatkan hasil sebagai berikut : Gambar 4.7 menunjukkan hasil *training* NN untuk Penyulang Basuki Rahmat, didapatkan nilai *error training* tertinggi pada bus 3 dengan nilai sebesar 0.00099832.

Dari gambar 4.8 dapat diketahui jumlah iterasi pada performansi *training* NN adalah sebanyak 435 iterasi dan waktu yang dibutuhkan untuk melakukan *training* pada NN adalah sebesar 9.410897 detik.

Pada gambar 4.9 didapatkan nilai hasil *training* ELM memiliki nilai *error* maksimum sebesar  $5.9622 \times 10^{-4}$  dan waktu yang dibutuhkan untuk melakukan *training* pada ELM adalah sebesar 0.4063 detik. Gambar 4.10 menunjukkan nilai hasil *testing* NN pada penyulang Basuki Rahmat.



**Gambar 4.10.** Perbandingan hasil testing NN dengan data perhitungan sesungguhnya

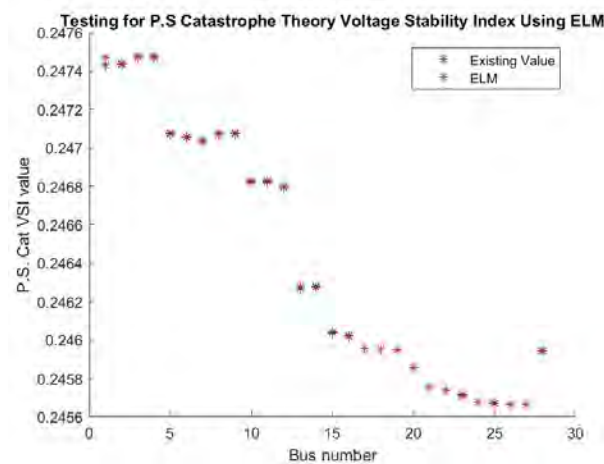


**Gambar 4.11.** Grafik performansi testing NN

Pada hasil testing dengan metode NN, didapatkan nilai *error training* tertinggi pada bus 29 dengan nilai sebesar 0.00099937.

Seperti pada gambar 4.11 mengenai performansi *testing* NN, didapatkan total iterasi untuk *testing* NN adalah sebesar 533 iterasi dan waktu eksekusi yang dibutuhkan untuk testing NN adalah sebesar 0.0938 detik.

Waktu eksekusi *testing* indeks stabilitas tegangan dengan menggunakan metode *NN Based P.S Cat VSI* 68.14% lebih cepat jika dibandingkan dengan metode *P.S Cat VSI* yang dilakukan dengan perhitungan matematis.



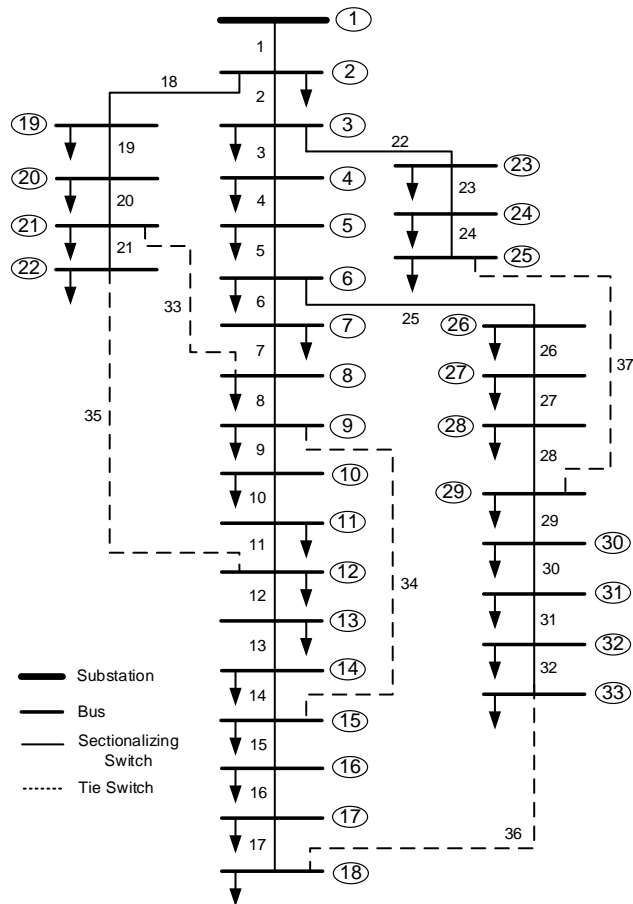
**Gambar 4.12.** Perbandingan hasil testing ELM dengan data perhitungan sesungguhnya

Pada gambar 4.12 adalah gambar hasil *testing* ELM based P.S Cat VSI. Didapatkan hasil *error* maksimum sebesar  $5.9622 \times 10^{-4}$  sedangkan waktu eksekusi yang dibutuhkan adalah sebesar 0.0469 detik.

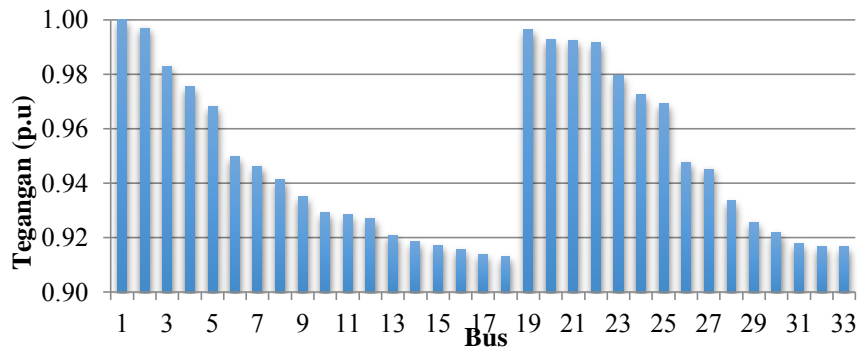
Dari hasil simulasi menggunakan NN dan ELM didapatkan bahwa metode ELM lebih baik jika digunakan untuk menentukan nilai index stabilitas tegangan pada sistem distribusi radial tidak seimbang. Karena metode ELM memiliki nilai *error* maksimum yang lebih kecil jika dibandingkan dengan metode NN yaitu sebesar  $5.9622 \times 10^{-4}$ , dan memiliki waktu eksekusi yang lebih cepat jika dibandingkan dengan metode *NN based P.S Cat VSI* maupun dibandingkan dengan metode *P.S Cat VSI* yaitu sebesar 0.0469 detik [25].

#### 4.5 Peningkatan Nilai Indeks Stabilitas Tegangan

Untuk Meningkatkan nilai indeks stabilitas tegangan dapat dilakukan dengan beberapa cara antara lain rekonfigurasi jaringan, dan penambahan kapasitor. Semua tahapan ini dilakukan pada sistem distribusi radial yang dianggap seimbang karena menyesuaikan dengan kondisi lapangan dimana peralatan *switch* yang membuka dan menutup langsung ketiga fasa dan kapasitor yang nilai kapasitansi tiap fasa sama. Detail hasil simulasi peningkatan nilai stabilitas tegangan diberikan sebagai berikut.



**Gambar 4.13** *Single line diagram* IEEE 33 bus kondisi awal



**Gambar 4.14** Profil tegangan IEEE 33 bus kondisi awal

Kondisi awal adalah kondisi dimana sistem distribusi IEEE 33 bus masih dalam keadaan normal. Pada kondisi awal ini belum dilakukan rekonfigurasi dan pemasangan kapasitor. Konfigurasi jaringan sistem distribusi IEEE 33 bus dalam keadaan normal sesuai dengan gambar 4.13. Berikut ini hasil dari simulasi pada kondisi awal ditampilkan pada gambar 4.14 dengan kondisi tegangan minimum dibus 18 sebesar 91.31 pu.

**Tabel 4.9** Hasil Aliran Daya IEEE 33 Bus Kondisi Awal

Bus	Tegangan (kV)	Saluran		Arus (A)	Losses (kW)
		Dari Bus	Ke Bus		
1	12,66	1	2	210,36	12,24
2	12,62	2	3	187,13	51,79
3	12,44	3	4	134,63	19,90
4	12,35	4	5	127,89	18,70
5	12,25	5	6	124,77	38,25
6	12,02	6	7	58,39	1,91
7	11,98	7	8	47,61	4,86
8	11,92	8	9	36,78	4,18
9	11,84	9	10	33,72	3,56
10	11,76	10	11	30,64	0,55
11	11,75	11	12	28,01	0,88
12	11,73	12	13	24,61	2,67
13	11,66	13	14	21,18	0,73
14	11,63	14	15	14,19	0,36
15	11,61	15	16	11,21	0,28
16	11,59	16	17	8,07	0,25
17	11,57	17	18	4,92	0,05
18	11,56	2	19	18,09	0,16
19	12,62	19	20	13,58	0,83
20	12,57	20	21	9,06	0,10
21	12,56	21	22	4,53	0,04
22	12,55	3	23	48,48	3,18
23	12,40	23	24	43,70	5,14
24	12,31	24	25	21,89	1,29
25	12,27	6	26	65,35	2,60
26	12,00	26	27	62,49	3,33
27	11,97	27	28	59,64	11,30
28	11,82	28	29	56,98	7,83
29	11,72	29	30	50,58	3,90
30	11,67	30	31	23,35	1,59
31	11,62	31	32	15,13	0,21
32	11,61	32	33	3,59	0,01
33	11,60	Total			202,69

Tabel 4.9 menjelaskan tentang hasil aliran daya pada sistem distribusi IEEE 33 bus. Gambar 4.15 menunjukkan hasil tegangan pada setiap bus di sistem distribusi IEEE 33 bus. Tabel 4.9 dan gambar 4.15 menunjukkan hasil simulasi pada

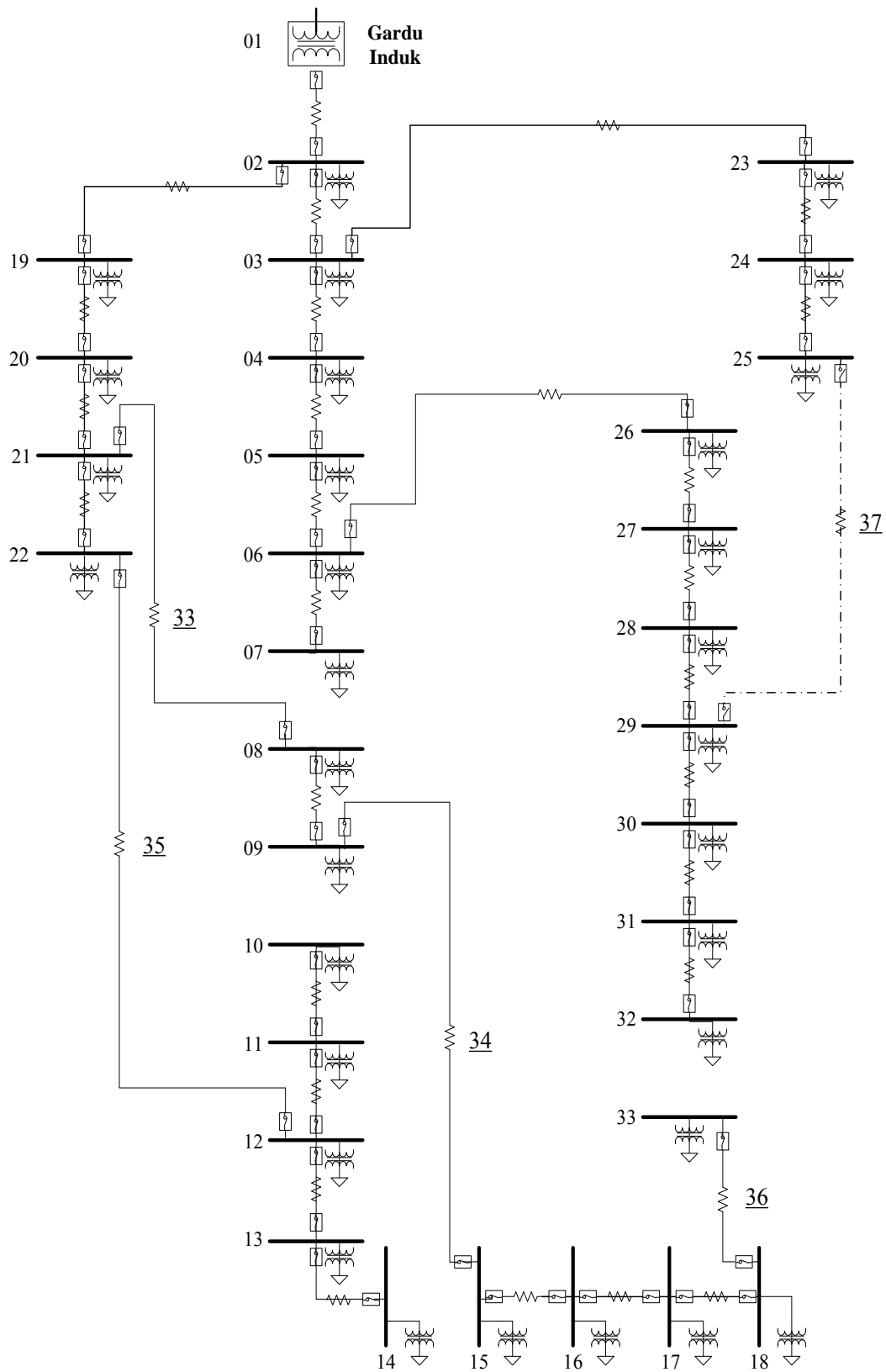
kondisi awal sebelum menerapkan rekonfigurasi dan pemasangan kapasitor. Nilai tegangan pada kondisi awal antara 0.91 pu sampai 1 pu. Tegangan yang berada dibawah 0.95 pu ada sebanyak 21 bus. Tegangan terkecil terdapat pada bus 18 karena bus 18 merupakan bus yang memiliki jarak paling jauh dari sumber. Hal ini menunjukkan bahwa tegangan pada kondisi awal masih melebihi batasan tegangan yang diijinkan yaitu antara 0.95 pu sampai 1.05 pu.

Sistem distribusi IEEE 33 bus pada kondisi awal dapat dikatakan mengalami undervoltage. Undervoltage adalah sesuatu kejadian yang terjadi ketika magnitude tegangan turun antara 0.8 s/d 0.9 pu dengan jangka waktu lebih dari 1 menit. Undervoltage muncul disebabkan oleh adanya rugi jaringan. Total nilai rugi jaringan pada kondisi awal sebesar 202.69 kW. Oleh karena itu diperlukan suatu cara untuk meminimalkan rugi jaringan sistem distribusi IEEE 33 bus. Langkah yang digunakan adalah metode rekonfigurasi dan pemasangan kapasitor. Rekonfigurasi dilakukan dengan cara mengatur ulang konfigurasi jaringan sistem distribusi dengan cara membuka dan menutup *switch*. Pemasangan kapasitor meliputi lokasi serta kapasitas kapasitor.

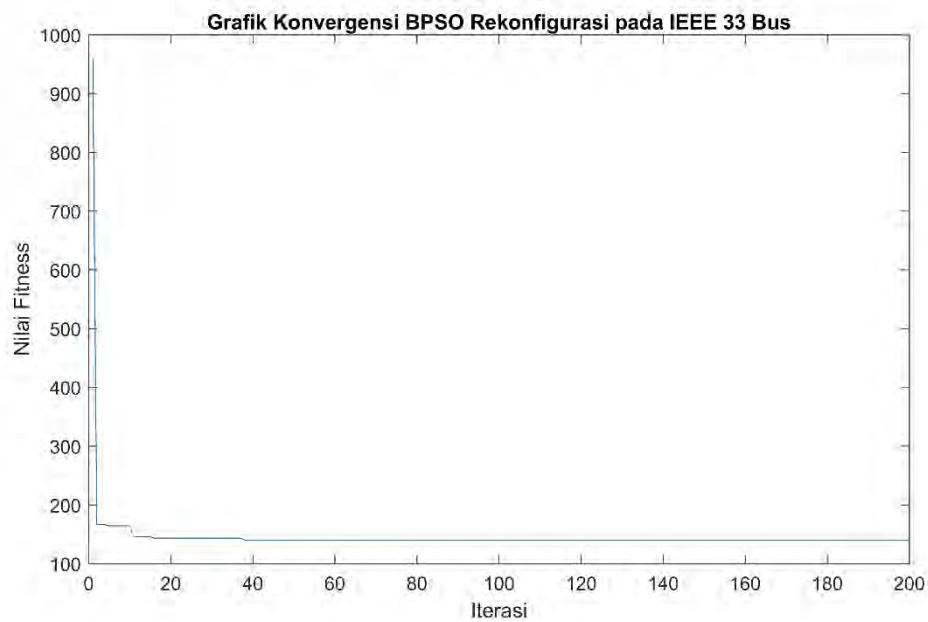
#### **4.5.1 Peningkatan Nilai Indeks Stabilitas Tegangan dengan Rekonfigurasi Jaringan.**

Status tie switch pada jaringan digunakan sebagai nilai dari posisi partikel. Jumlah partikel yang digunakan adalah sebesar 30 buah partikel dengan jumlah iterasi 200 iterasi [28]. Gambar *Single Line Diagram* sistem IEEE 33 bus setelah rekonfigurasi jaringan dapat dilihat pada gambar 4.15 dibawah.

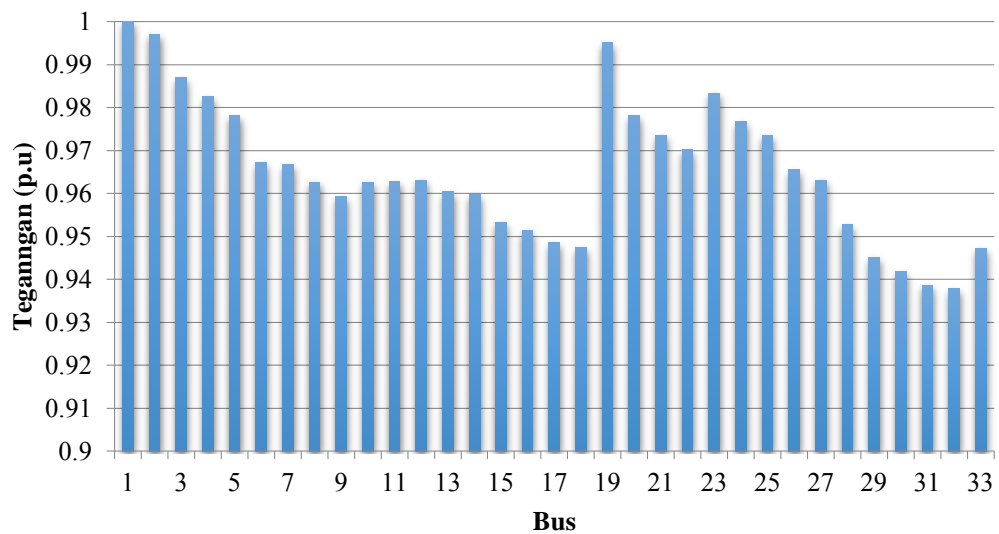




**Gambar 4.15** *Single Line Diagram* Jaringan Distribusi 33-bus Setelah Rekonfigurasi



**Gambar 4.16** Grafik konvergensi BPSO untuk rekonfigurasi jaringan



**Gambar 4.17** Profil Tegangan Sistem IEEE 33-bus Setelah Rekonfigurasi

Dari gambar 4.16 didapatkan bahwa hasil running konvergensi BPSO untuk rekonfigurasi jaringan sistem IEEE 33 bus didapatkan pada iterasi ke 60. Hasil perhitungan algoritma aliran daya sistem 33-bus pada kondisi setelah rekonfigurasi dapat dilihat pada Tabel 4.10. Profil tegangan setiap bus sistem 33-bus pada kondisi setelah rekonfigurasi ditunjukkan Gambar 4.17. Nilai tegangan minimum adalah 0.9378 pu pada bus 32.

**Tabel 4.10** Kondisi Tegangan Sebelum dan Setelah rekonfigurasi Jaringan

No. bus	Sebelum Rekonfigurasi		Setelah Rekonfigurasi	
	Tegangan (p.u)	Angle (derajat)	Tegangan (p.u)	Angle (derajat)
1	1	0	1	0
2	0,997	0,0145	0,9971	0,0145
3	0,9829	0,096	0,987	0,0972
4	0,9755	0,1617	0,9825	0,1632
5	0,9681	0,2283	0,9782	0,2299
6	0,9497	0,1338	0,9673	0,2487
7	0,9462	-0,0965	0,9667	0,2086
8	0,9413	-0,0599	0,9626	-0,6848
9	0,935	-0,133	0,9593	-0,7364
10	0,9292	-0,196	0,9627	-0,6242
11	0,9284	-0,1887	0,9628	-0,6242
12	0,9269	-0,1773	0,9631	-0,6264
13	0,9208	-0,2686	0,9605	-0,6415
14	0,9185	-0,3472	0,9597	-0,6579
15	0,9171	-0,3849	0,9532	-0,8928
16	0,9157	-0,4082	0,9514	-0,9154
17	0,9137	-0,4855	0,9485	-10,075
18	0,9131	-0,495	0,9475	-10,185
19	0,9965	0,0037	0,9951	-0,0225
20	0,9929	-0,0633	0,9782	-0,3061
21	0,9922	-0,0827	0,9736	-0,4252
22	0,9916	-0,103	0,9702	-0,5154
23	0,9794	0,0651	0,9834	0,0665
24	0,9727	-0,0237	0,9768	-0,0215
25	0,9694	-0,0674	0,9735	-0,0648
26	0,9477	0,1733	0,9655	0,2859
27	0,9452	0,2295	0,9632	0,3388
28	0,9337	0,3124	0,9527	0,424
29	0,9255	0,3903	0,9451	0,5027
30	0,9219	0,4956	0,9419	0,6016
31	0,9178	0,4112	0,9385	0,5284
32	0,9169	0,3881	0,9378	0,5102
33	0,9166	0,3804	0,9472	-10,225

Dari hasil analisis aliran daya sistem 33-bus pada kondisi setelah rekonfigurasi didapatkan total kerugian daya aktif sebesar 139,2168 kW dan total kerugian daya reaktif sebesar 102,0619 kVAR serta tegangan minimum terjadi di bus-32 sebesar 0,9378 per unit. Dari nilai indeks stabilitas tegangan terkecil setelah rekonfigurasi didapatkan pada bus 32 dengan nilai sebesar 0.2125.

Dari tabel 4.11 dibawah didapatkan nilai konfigurasi optimal dengan saluran no 7, 9, 14, 32 dan 37 yang dibuka. Dari hasil tersebut didapatkan nilai tegangan rata-rata sebesar 0.9652 dan nilai indek stabilitas terkecil sebesar 0.1921 pada bus 18.

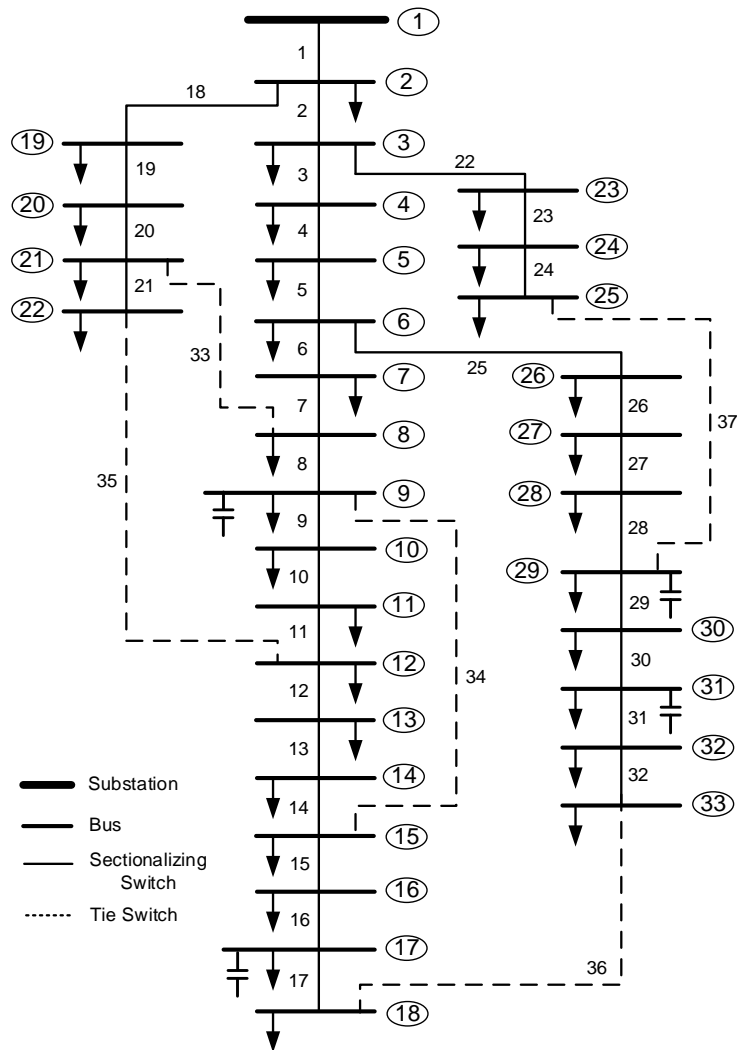
**Tabel 4.11** Kondisi Penyulang IEEE 33 Bus sebelum dan setelah rekonfigurasi Jaringan

Kondisi	Saluran yang Dibuka	Kerugian daya (kW)	indeks stabilitas tegangan minimum	Tegangan Rata-Rata (p.u.)
Sebelum Rekonfigurasi	33, 34, 35, 36, 37	202,6845	0.1742	0,9485
Setelah Rekonfigurasi	7, 9, 14, 32, 37	139,2168	0.1921	0,9652

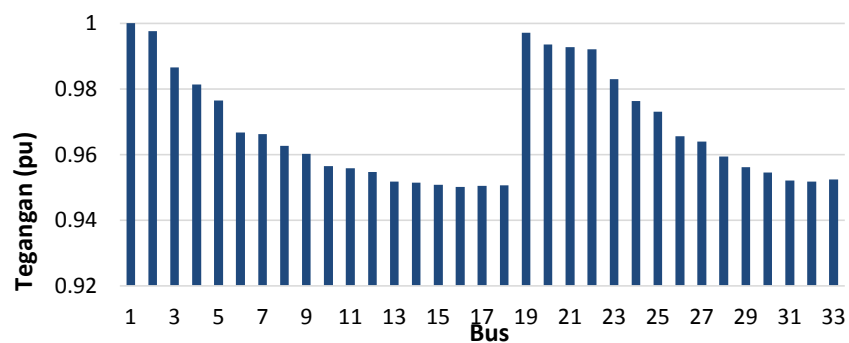
Dari hasil simulasi peningkatan nilai indeks stabilitas tegangan pada tabel 4.12 jika hanya menggunakan proses rekonfigurasi jaringan akan didapatkan kenaikan nilai indeks stabilitas tegangan terendah di bus 18 dari nilai 0.1742 menjadi 0.1921. Akan tetapi didalam proses rekonfigurasi masih dijumpai nilai tegangan dibawah 0.95 sehingga constrain yang digunakan tidak memperhatikan batas tegangan minimum sebesar 0.95 tetapi digunakan fungsi objektif nilai tegangan rata-rata diatas 0.95 pu.

#### **4.5.2 Peningkatan Nilai Indeks Stabilitas Tegangan dengan Pemasangan Kapasitor**

Tahap ini dilakukan pemasangan kapasitor pada sistem distribusi radial IEEE 33 bus. Pemasangan kapasitor bertujuan untuk meningkatkan nilai indeks stabilitas tegangan. Pengoptimalan kapasitor dilakukan menggunakan *Binary Firefly Algorithm* (BFA) untuk lokasi serta kapasitas kapasitor. Konfigurasi sistem distribusi IEEE 33 bus setelah dilakukan pemasangan kapasitor seperti ditunjukkan pada gambar 4.18. Pada gambar 4.18 terdapat 4 buah kapasitor pada sistem distribusi IEEE 33 bus. Pemasangan 4 buah kapasitor tersebar di 4 bus sistem distribusi IEEE 33 bus. Hasil simulasi setelah dilakukan pemasangan kapasitor dapat dilihat pada tabel 4.13 dan gambar 4.19.



**Gambar 4.18** Single Line Diagram IEEE 33 bus Setelah pemasangan kapasitor



**Gambar 4.19** Profil tegangan IEEE 33 bus setelah pemasangan kapasitor

Tabel 4.12 menunjukkan hasil aliran daya pada sistem distribusi IEEE 33 bus setelah pemasangan kapasitor. Data yang ditampilkan adalah data tegangan, arus dan rugi jaringan pada sistem distribusi IEEE 33 bus.

**Tabel 4.12** Hasil Aliran Daya IEEE 33 Bus Setelah Pemasangan Kapasitor

Bus	Tegangan (kV)	Saluran		Arus (A)	VSI
		Dari Bus	Ke Bus		
1	12,6600	1	2	177,71	0.25
2	12,6298	2	3	155,49	0.247
3	12,4906	3	4	107,29	0.2368
4	12,4251	4	5	102,06	0.2319
5	12,3618	5	6	99,45	0.2272
6	12,2383	6	7	42,67	0.2182
7	12,2330	7	8	44,88	0.2181
8	12,1873	8	9	38,44	0.2149
9	12,1556	9	10	30,02	0.2129
10	12,1084	10	11	27,39	0.2094
11	12,1000	11	12	25,68	0.2088
12	12,0857	12	13	23,55	0.2077
13	12,0489	13	14	21,72	0.2049
14	12,0448	14	15	14,01	0.2044
15	12,0363	15	16	11,62	0.2043
16	12,0286	16	17	9,85	0.2042
17	12,0325	17	18	8,81	0.2059
18	12,0347	2	19	18,08	0.2054
19	12,6231	19	20	13,57	0.2049
20	12,5778	20	21	9,05	0.2436
21	12,5689	21	22	4,53	0.2429
22	12,5608	3	23	48,30	0.2423
23	12,4454	23	24	43,53	0.2388
24	12,3613	24	25	21,80	0.2272
25	12,3193	6	26	44,25	0.2241
26	12,2236	26	27	41,57	0.2231
27	12,2047	27	28	38,94	0.2158
28	12,1453	28	29	36,33	0.2113
29	12,1055	29	30	31,80	0.2084
30	12,0845	30	31	20,22	0.2063
31	12,0537	31	32	13,97	0.2061
32	12,0500	32	33	10,46	0.2053
33	12,0575				0.2051

Profil tegangan sistem distribusi IEEE 33 bus setelah pemasangan kapasitor terlihat seperti pada gambar 4.19. Tegangan di setiap bus sistem distribusi memiliki nilai diatas 0.95 pu. Dijelaskan lebih detail pada tabel 4.12 bahwa nilai indeks stabilitas tegangan terendah sebesar 0.2051 pada bus 33 dan tegangan terendah pada bus 18 sebesar 0.95 pu. Hal ini menunjukkan bahwa tidak ada bus yang mengalami undervoltage. Semua nilai tegangan berada dalam batasan tegangan yang diijinkan. Detail hasil simulasi penembahan kapasitor terdapat pada tabel 4.13 dibawah ini.

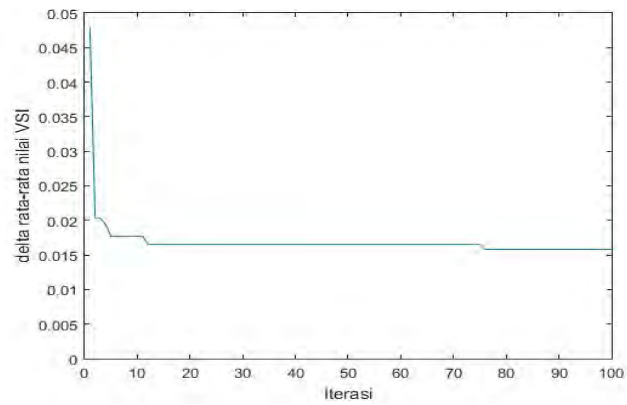
**Tabel 4.13** Hasil Pemasangan Kapasitor Menggunakan Metode BFA

Kapasitor			Tegangan		Deviasi		VSI min
Daya (kVAR)	Total (kVAR)	Lokasi	Max (pu)	Min (pu)	Max	Min	
450, 350, 350, 600	1800	9, 17, 29, 31	1	0,950	0	-0,05	0.2042

Dari tabel 4.13 didapatkan nilai pemasangan lima kapasitor optimal didapatkan pada bus 9, 17, 29 dan 31 dengan nilai masing-masing kapasitor pada bus adalah 450 kVAR, 350 kVAR, 350 kVAR, dan 600 kVAR. Dari pemasangan kapasitor tersebut didapatkan deviasi tegangan terbesar adalah 0.05 pu dan nilai VSI minimum adalah 0.2042 pada bus 18.

#### 4.5.3 Peningkatan Nilai Indeks Stabilitas Tegangan dengan Rekonfigurasi Jaringan dan Pemasangan Kapasitor

Pada sub bab ini akan dilakukan proses peningkatan nilai indeks stabilitas tegangan dengan melakukan rekonfigurasi jaringan dan pemasangan kapasitor secara simultaneous (secara bersamaan). Proses optimasi dilakukan dengan menggunakan metode *Binary Firefly Algorithm*. Jumlah kunang-kunang yang digunakan sebanyak 10 buah. Jumlah iterasi yang digunakan 100 iterasi dan fungsi objektif yang digunakan adalah minimum rata-rata deviasi nilai indeks stabilitas tegangan. Kunang-kunang dalam simulasi berisi nilai biner dari kombinasi switch, letak bus dan ukuran kapasitor. Grafik konvergensi dari simulasi dapat dilihat pada gambar 4.20 dibawah ini. Dari hasil grafik simulasi rekonfigurasi dan pemasangan kapasitor pada gambar 4.20 didapatkan nilai deviasi minimum nilai rata-rata indeks stabilitas tegangan adalah sebesar 0.01554. Detail hasil pemasangan kapasitor dan rekonfigurasi menggunakan BFA terdapat pada tabel 4.14



**Gambar 4.20** grafik konvergensi simulasi BFA.

**Tabel 4.14** Rekapitulasi nilai tegangan dan indeks stabilitas tegangan hasil simulasi BFA

No Bus	Hasil Simulasi	
	Tegangan (pu)	vsi
1	1	0.25
2	0.9975	0.2475
3	0.989	0.2391
4	0.9875	0.2377
5	0.9864	0.2367
6	0.9846	0.235
7	0.984	0.2344
8	0.9773	0.2329
9	0.9661	0.2164
10	0.9672	0.2149
11	0.9676	0.2159
12	0.9685	0.2159
13	0.966	0.2123
14	0.9652	0.2168
15	0.9659	0.2166
16	0.9658	0.2166
17	0.9678	0.2152
18	0.9672	0.2186
19	0.996	0.2186
20	0.9836	0.2401
21	0.9805	0.223
22	0.9769	0.2234
23	0.9829	0.2276
24	0.9712	0.2334
25	0.9629	0.222
26	0.9845	0.2124
27	0.9845	0.2348
28	0.984	0.2367
29	0.9601	0.2339
30	0.9579	0.2104
31	0.9539	0.2069
32	0.953	0.2062
33	0.9527	0.206



**Tabel 4.15** Perbandingan nilai indek stabilitas tegangan untuk kondisi normal, rekonfigurasi jaringan, pemasangan kapasitor dan rekonfigurasi plus pemasangan kapasitor

No Bus	VSI			
	normal	recon	cap	cap+recon
1	0.25	0.25	0.25	0.25
2	0.2472	0.2467	0.2476	0.2475
3	0.247	0.2468	0.2368	0.2382
4	0.2333	0.2378	0.2319	0.2365
5	0.2263	0.2345	0.2272	0.2351
6	0.2195	0.2317	0.2182	0.2321
7	0.2032	0.2259	0.2181	0.2315
8	0.2004	0.2061	0.2149	0.2306
9	0.1963	0.2149	0.2129	0.2203
10	0.1911	0.1982	0.2094	0.2233
11	0.1864	0.2116	0.2088	0.2371
12	0.1857	0.2147	0.2077	0.2443
13	0.1845	0.2148	0.2049	0.2503
14	0.1797	0.2145	0.2044	0.2551
15	0.1779	0.2093	0.2043	0.2488
16	0.1768	0.209	0.2042	0.2191
17	0.1758	0.2064	0.2059	0.2185
18	0.1742	0.1921	0.2054	0.215
19	0.1738	0.2024	0.2049	0.2087
20	0.1733	0.1861	0.2436	0.2401
21	0.243	0.2277	0.2429	0.2268
22	0.2423	0.2276	0.2423	0.2289
23	0.2417	0.2236	0.2388	0.2405
24	0.2382	0.2095	0.2272	0.2317
25	0.2238	0.2324	0.2241	0.2194
26	0.2207	0.2166	0.2231	0.2079
27	0.219	0.2186	0.2158	0.2302
28	0.1995	0.2115	0.2113	0.2289
29	0.19	0.2083	0.2084	0.2302
30	0.1834	0.2056	0.2063	0.2076
31	0.1806	0.198	0.2061	0.2035
32	0.1774	0.1916	0.2053	0.2037
33	0.1767	0.1938	0.2051	0.205

Rekapitulasi nilai tegangan dan indek stabilitas tegangan hasil simulasi terdapat pada tabel 4.14. Dari hasil simulasi pada tabel 4.14 didapatkan nilai indek stabilitas tegangan minimum terdapat pada bus 33 dengan nilai 0.206. Perbandingan nilai indek stabilitas tegangan untuk kondisi normal, rekonfigurasi jaringan, pemasangan kapasitor dan rekonfigurasi plus pemasangan kapasitor ditunjukkan pada tabel 4.15 diatas.

**Tabel 4.16** Perbandingan Hasil pemasangan kapasitor biasas dan dengan rekonfigurasi

Metode	Lokasi dan Ukuran Kapasitor			Tegangan		Deviasi		VSI min
	Daya	Total	Lokasi	Max	Min	Max	Min	
	(kVAR)	(kVAR)		(pu)	(pu)			
Cap	450, 350,350, 600	1800	9, 17, 29, 31	1	0.95	0	-0,05	0.204
Cap+rec	50,500,550,500,250	1850	8,11,12,17,31	1	0.9527	0	-0.0473	0.206

Dari seluruh proses peningkatan nilai indeks stabilitas tegangan, hasil peningkatan nilai indeks stabilitas tegangan terbesar diperoleh dari rekonfigurasi jaringan plus pemasangan kapasitor dengan kenaikan nilai indeks stabilitas tegangan rata-rata sebesar 0.02. Untuk perbandingan nilai kapasitor antara proses penambahan kapasitor saja dan penambahan kapasitor disertai rekonfigurasi jaringan terdapat pada tabel 4.16.

Dari hasil simulasi didapatkan bahwa dengan total kapasitor yang sama, untuk simulasi kapasitor plus rekonfigurasi akan menghasilkan kenaikan tegangan yang lebih besar yaitu dari 0.95 menjadi 0.9527 dan nilai indeks stabilitas tegangan minimum yang lebih tinggi yaitu dari 0.204 menjadi 0.206. Sehingga dari seluruh simulasi dapat ditarik kesimpulan bahwa untuk proses menaikkan nilai indeks stabilitas tegangan akan menghasilkan nilai yang paling optimal jika menggunakan gabungan rekonfigurasi dan penambahan kapasitor.

*Halaman ini Sengaja Dikosongkan*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN dan SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari riset dan simulasi yang telah dilakukan pada penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Penelitian ini mengusulkan sebuah formulasi baru untuk melakukan analisis stabilitas tegangan pada sistem distribusi radial tiga fasa dengan menggunakan metode *Positive Sequence Cathastrophe Theory* (P.S Cat VSI). Metode ini menggunakan gabungan konsep *Sequence Component* dengan metode *Catastrophe Theory* yang telah dikembangkan untuk menganalisis stabilitas tegangan pada sistem distribusi satu fasa. Waktu eksekusi metode *Catastrophe theory VSI* (P.S Cat VSI) 5% lebih cepat jika dibandingkan dengan metode *Positive Sequence Voltage Ranking Index* (P.S VRI) dan 12% lebih cepat jika dibandingkan metode *Positive Sequence Voltage Stability Index* (P.S VSI).
2. Didalam disertasi ini juga dikembangkan metode ELM berbasis P.S Cat VSI untuk mempercepat eksekusi waktu penentuan indeks stabilitas tegangan pada setiap bus. Didapatkan bahwa waktu eksekusi metode ELM berbasis P.S Cat VSI lebih cepat sebesar 90% jika dibandingkan metode NN berbasis P.S Cat VSI dan 84% lebih cepat jika dibandingkan dengan metode perhitungan matematis P.S Cat VSI.
3. Dilakukan peningkatan nilai indeks stabilitas tegangan dengan menggunakan rekonfigurasi jaringan, pemasangan kapasitor dan rekonfigurasi plus pemasangan kapasitor.
4. Dengan melakukan rekonfigurasi dapat menaikkan nilai indeks stabilitas tegangan dari 0.19828 menjadi 0.2125 atau naik sekitar 7% dengan *switch* yang dibuka adalah 7, 9, 14, 32, 37.
5. Didalam simulasi pemasangan kapasitor digunakan untuk menaikkan nilai tegangan. Didapatkan letak dan ukuran kapasitor yang optimal adalah pada bus 9, 17, 29 dan 31 dengan nilai masing-masing kapasitor pada bus adalah 450 kVAR, 350 kVAR, 350 kVAR, dan 600 kVAR..

## **5.2 Saran**

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah dengan menambahkan pemodelan transformer pada analisis aliran daya yang dilakukan agar dapat diketahui kondisi sistem baik untuk ditekangan tinggi dan tegangan rendah.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Ajjarapu V, Lee B. "Bibliography on voltage stability". IEEE Transactions on Power Systems 1998; 13(1):115±25.
- [2]. Jasmon GB, Lee LHCC. "Distribution network reduction for voltage stability analysis and load Flow calculations". International Journal of Electrical Power and Energy Systems 1991; 13(1):9±13.
- [3]. Gubina F, Strmcnik B. "A simple approach to voltage stability assessment in radial networks". IEEE Transactions on Power Systems, 1997; 12(3):1121±8.
- [4]. M. Chakravorty, D. Das." Voltage stability analysis of radial distribution networks". Electrical Power and Energy Systems 23 (2001) 129±135.
- [5]. Mohamed M. Aly, and Mamdouh Abdel-Akher, "A Continuation Power-Flow for Distribution Systems Voltage Stability Analysis", International Conference on Power and Energy (PECon), 2-5 December 2012, Kota Kinabalu Sabah, Malaysia.
- [6]. Ching-Yin Lee, Shao-Hong Tsai, and Yuan-Kang Wu, "A new approach to the assessment of steady-state voltage stability margins using the P–Q–V curve", Electrical Power and Energy Systems 32 (2010) 1091–1098.
- [7]. Sayonsom Chanda, and Bappa Das,"Identification of Weak Buses in a Power Network Using Novel Voltage Stability Indicator in Radial Distribution System", India International Conference on Power Electronics (IICPE), 2010.
- [8]. G.A. Mahmoud,"Voltage stability analysis of radial distribution networks using catastrophe theory", IET Gen. Trans. Dist, 2012, Vol. 6, pp. 612–618.
- [9]. XP Zhang, Ping Ju, and E Handschin, "Continuation Three-Phase Power Flow: A Tool for Voltage Stability Analysis of Unbalanced Three-Phase Power Systems", IEEE Trans on Power Systems, Vol. 20, No. 3, August 2005.
- [10]. P. Juanuwattanakul, and Mohammad A.S. Masoum, "Increasing distributed generation penetration in multiphase distribution networks considering grid losses, maximum loading factor and bus voltage limits", IET Generation Transmission Distribution, 2012, Vol. 6, Iss. 12, pp. 1262–1271.
- [11]. Mamdouh Abdel-Akher," Voltage stability analysis of unbalanced distribution systems using backward/forward sweep load-flow analysis method with secant predictor", IET Generation Transmission Distribution, 2013, Vol. 7, Iss. 3, pp. 309–317.
- [12]. Vahid Farahani, Behrooz Vahidi, and Hossein Askarian Abyaneh, "Reconfiguration and Capacitor Placement Simultaneously for Energy Loss Reduction Based on an Improved Reconfiguration Method", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 27, No. 2, May 2012.
- [13]. Abdullah Asuhaimi Hohd Zin, Ali Khorasani Ferdavani, Azhar Bin Kharuddin, M. M. Naeini, "Reconfiguration of Radial Electrical Distribution Network through Minimum Current Circular Updating Mechanism Method", IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 27, No. 2, May 2012.
- [14]. C.S. Chen, C.H. Lin, C.J. Wu, M.S.Kang, "Feeder Reconfiguration for Distribution System Contingencies by Object Oriented Programming", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000.
- [15]. R. Balanathan, N.C. Pahalawaththa, U.D Annakkage, and P.W. Sharp, "Undervoltage load shedding to avoid voltage instability", IEEE prociding-Generator Transmission Distribution, Vol 145 No 2 March 1998.

- [16]. S. Hirodonitis, H. Li, and P.A Crossley, "Load Shedding in a Distribution Network", SUPERGEN '09 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 2009.
- [17]. M.H. Moradi, and M. Abedini, "Optimal Load Shedding Approach in Distribution Systems for Improved Voltage Stability", The 4<sup>th</sup> International Power Engineering and Optimization Conf. (PEOCO2010), Shah Alam, Selangor, MALAYSIA: 23-24 June 2010.
- [18]. Y. Wang, I.R. Pordanjani, W.Li, and E. Vaahedi, "Strategy to minimise the load shedding amount for voltage collapse prevention", IET Generation Transmission Distribution, 2011, Vol. 5, Iss. 3, pp. 307–313.
- [19]. Adeyemi Charles Adewole, Raynitchka Tzoneva, Alexander Apostolov, "Adaptive under-voltage load shedding scheme for large interconnected smart grids based on wide area synchrophasor measurements", IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, Vol. 10, pp. 1957–1968.
- [20]. P. Vijay Babu, S. P. Singh, "Optimal Capacitor Placement in RDS using combined Fuzzy & Novel power loss sensitivity method", IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS) 2016.
- [21]. Taegyun Kim, Yunhwan Lee, Byongjun Lee, Hwachang Song, and Taekyun Kim, "Optimal Capacitor Placement considering Voltage Stability Margin based on improved PSO algorithm", 15<sup>th</sup> International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems (ISAP), 2009.
- [22]. Attia A. El-Fergany, and Almoataz Y. Abdelaziz, "Efficient heuristic-based approach for multi-objective capacitor allocation in radial distribution networks", IET Gener. Transm. Distrib. 2014, Vol. 8, Iss. 1, pp. 70–80
- [23]. Sushanta Paul, Student, and Dr. Ward Jewell, "Optimal Capacitor Placement and Sizes for Power Loss Reduction using Combined Power Loss Index-Loss Sensitivity Factor and Genetic Algorithm", IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012.
- [24]. P Uman, D Fajar, O Penangsang, A Soeprijanto, H Miyauchi, "Positive sequence based catastrophe theory voltage stability index to analyzed the voltage stability index in the unbalanced radial distribution systems", International Review of Automatic Control vol 9 no. (2), pp. 128-134, 2016.
- [25]. P Uman, D Fajar, O Penangsang, A Soeprijanto, H Miyauchi, "Unbalanced Radial Distribution Systems Voltage Stability Index Using Extreme Learning Machine", International Review of Electrical Engineering Vol. 11, No. 4 Juli-Agustus pp. 428-434 2016.
- [26]. Dimas Fajar U. P., Indri Suryawati, Ontoseno Penangsang, Adi Suprijanto, and Mat Syai'in, "Online State Estimator for Three Phase Active Distribution Networks Displayed on Geographic Information System.", Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 2, No. 4, October 2014.
- [27]. Dimas Fajar Uman P, Fitriana Suhartati, A. Budiman, Ontoseno Penangsang, Adi Soeprijanto." Under Voltages Load Shedding Based on Catastrophe Theory Method for Surabaya Electrical Distribution Systems". 14<sup>th</sup> International Seminar on Intelligent Technology And Its Applications (SITIA), May 2013.
- [28]. Aji Akbar Firdaus, Ontoseno Penangsang, Adi Soeprijanto, Dimas Fajar U. P. "Rekonfigurasi Jaringan Distribusi Menggunakan Binary Particle Swarm

- Optimization Untuk Menaikkan Nilai Indeks Stabilitas Tegangan”. Prosiding SNaPP 2014 Sains, Teknologi, dan Kesehatan, 2014.
- [29]. Partha Kayal, Sayonsom Chanda and C. K. Chanda, “An ANN Based Network Reconfiguration Approach for Voltage Stability Improvement of Distribution Network”, International Conference on Power and Energy Systems (ICPES) 2011.
  - [30]. R.Chidanandappa, Dr.T, Ananthapadmanabha, “An Integrated Gravitational Search Multi-Objective Algorithm for Distribution Network Feeder Reconfiguration with DGs”, International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT) 2016.
  - [31]. Bhavesh Vyas, Dr. M.P.Sharma, and Mrs. Smriti Jain, “Feeder Reconfiguration of Distribution Network Using Minimum Power Flow Methodology”, Annual IEEE India Conference (INDICON) 2015.
  - [32]. Khyati Mistry, Ranjit Roy, “Enhancement of Voltage Stability Index of Distribution System by Network Reconfiguration Including Static Load Model and Daily Load Curve”, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies-India 2011.
  - [33]. S. M. Moghaddas-Tafreshi, Elahe Mashhour, "Distributed generation modeling for power flow studies and a three-phase unbalanced power flow solution for radial distribution systems considering distributed generation," Electric Power Systems Research, Vol. 79, pp. 680-686, 2009.
  - [34]. William H. Kersting, “Distribution System Modeling and Analysis” CRC PRESS 2002.
  - [35]. Jen-Hao TENG, “A Network-Topology-based Three-Phase Load Flow for Distribution Systems”, Proc. Natl. Sci. Counc. ROC (A) Vol.24, No.4, 2000. pp. 259-264.
  - [36]. T.-H. Chen, N.-C. Yang, “Three-phase power-flow by direct Zbr method for unbalanced radial distribution systems”, IET Gener.Transm.Distrib., 2009, Vol.3, Iss.10, pp.903-910.
  - [37]. Hadi Saadat, “Power System Analysis” Second Edition, Mc Graw Hill, Chapter 10 2004.
  - [38]. Huang, G.B., Zhu, Q.Y. and Siew, C.K 2004. Extreme Learning Machine: A New Learning Scheme of Feed forward Neural Networks. *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks*
  - [39]. Huang, G.B., Zhu, Q.Y. and Siew, C.K 2006. Extreme Learning Machine: Theory and Application. *Journal of Science Direct neurocomputing* 70: 489-501.
  - [40]. Bambang Irawan, Ontoseno Penangsang, “Analisis Stabilitas Tegangan menggunakan Positive Sequence Voltage Ranking Index untuk Penempatan Kapasitor pada Jaringan Distribusi Tiga Fasa PT. PLN APJ Surabaya Utara”. Jurnal Teknik Pomits Vol 1 2015.
  - [41]. J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle Swarm Optimization”, In IEEE Int. Conf on Neural Networks, Perth, Australia, pp1942-1948, 1995.
  - [42]. Nara, K., Shiose, A., Kiagawa, M., Ishihara, T., “Implementation of genetic algorithm for distribution system loss minimum configuration”, IEEE Trans. Power Syst., 1992, 7, (3), pp. 1044–1051.



- [43]. Zhu, J.Z., “Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm”, *Electr. Power Syst. Res.*, 2002, 62, (1), pp. 37–42.
- [44]. Y. Shi, R. Eberhart, “Empirical Study of Particle Swarm Optimization”, In *Proceedings of the 1999 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Piscataway, NJ, IEEE Press, pp 1945-1950, 1999.
- [45]. Xin-She Yang, “Nature Inspired, Luniver Press”, Second Edition (2010).
- [46]. Mojtaba Ahmadi Khansar., Mohammad Teshnehlab., Mahdi Aliyari Shoorehdeli., “A Novel Binary Particle Swarm Optimization”, *Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on Control and Automation*, July 2007, Athens-greece.
- [47]. Meysam, S., Sadegh, S., Zayandehroodi, H., Eslami, M., dan Khajehzadeh, A., (2014), “Capasitor Location and Size Determination to Reduce Power Losses of a Distribution Feeder by Firefly Algorithm”, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 5, Iss.9, hal 419-424.
- [48]. S. Mostafa, Dakhem M., Sarvi M., dan Kordkheili H. H., “Optimal Reconfiguration and Capacitor Placement for Power Loss Reduction of Distribution System Using Improved Binary Particle Swarm Optimization”, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2014. hal 1-11.
- [49]. Chang, C.F., “Reconfiguration and Capacitor Placement for Loss Reduction of Distribution Systems by Ant Colony Search Algorithm”, *IEEE Trans. Power Systems*, 2008. Vol. 23, No. 4, hal 1747-1755.

# CURRICULUM VITAE

DIMAS FAJAR UMAN PUTRA



## PERSONAL IDENTITY

---

Date and Place of Birth	: Surabaya, November 8 <sup>th</sup> 1988
Academic Status	: Student of Power System Engineering, Electrical Engineering Department, Faculty of Industrial Technology, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Registration Number	: 2212.301.016
Gender	: Male
Religion	: Islam
Nationality	: Indonesia
Original Addrres	: Perumahan Grand Semanggi Residence C-43 Surabaya
Living Address	: Perumahan Grand Semanggi Residence C-43 Surabaya
Mobile Phone Number	: 03160856961/ 085645111966
<i>e-mail</i>	: <a href="mailto:dimasfup@gmail.com">dimasfup@gmail.com</a> ; <a href="mailto:dimasfup@ee.its.ac.id">dimasfup@ee.its.ac.id</a>

## EDUCATIONAL BACKGROUND

- 1993 – 1994 : Surabaya Bina Insani Kindergarten  
(TK Bina Insani Surabaya)
- 1994 – 2000 : Madiun Public Kanigoro 03 Elementary School  
(SDN Kanigoro 03 Madiun)
- 2000 – 2003 : Surabaya Public Junior High School 1  
(SLTP Negeri 1 Surabaya)
- 2003 – 2006 : Surabaya Public Senior High School 5  
(SMA Negeri 5 Surabaya)
- 2006 – 2010 : Undergraduate Program in Electrical Engineering Department,  
Faculty of Industrial Technology, Surabaya Sepuluh Nopember  
Institute of Technology  
(Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut  
Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya)
- 2010 – 2012 : Magister Program in Electrical Engineering Department, Faculty of  
Industrial Technology, Surabaya Sepuluh Nopember Institute of  
Technology  
(Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut  
Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya)
- 2012 – Now : Doctoral Program in Electrical Engineering Department, Faculty of  
Industrial Technology, Surabaya Sepuluh Nopember Institute of  
Technology  
(Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut  
Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya)

## LANGUAGES

Indonesian : mother tongue

English :good

## RESEARCH & PUBLICATIONS

- Conference on SITIA 2011,"Contingency Analysis for South and West Sulawesi", **Dimas Fajar Uman P**, Ontoseno Penangsang, Adi Soeprijanto. ITS, 2011
- Conference on APTECT 3," Intelligent Underfrequency Load Shedding for 500kV Java-Bali Electrical Power System", **Dimas Fajar Uman P**, Ontoseno Penangsang, Adi Soeprijanto, M.Abdillah. ITS 2011
- Conference on SITIA 2013," Under Voltages Load Shedding Based on Catastrophe Theory Method for Surabaya Electrical Distribution Systems", **Dimas Fajar Uman P**, Fitriana Suhartati, A. Budiman, Ontoseno Penangsang, Adi Soeprijanto. Surabaya 2013.
- Conference on ISS 2013," Optimal VAR Injection Based on Neural Network Current State Estimator for 20kV Surabaya Electrical Distribution System", **Dimas Fajar Uman P**, Ontoseno Penangsang, Adi Soeprijanto. Bogor 2013
- Conference on APTECT 4," On-line State Estimator for Three Phase Distribution Networks Displayed on Geographic Information System", Indri Suryawati, Ontoseno Penangsang, Adi Suprijanto, **Dimas Fajar U P**, Mat Syai'in. Surabaya 2013
- Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 2, No. 4," Online State Estimator for Three Phase Active Distribution Networks Displayed on Geographic Information System", **Dimas Fajar U. P.**, Indri Suryawati, Ontoseno Penangsang, Adi Suprijanto, and Mat Syai'in, October 2014.
- Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 2, No. 4," Capacitor Placement and Sizing in Distorted Distribution Systems Using Simplified Direct Search Algorithm", Fitriana Suhartati, **Dimas Fajar U. P.**, Ontoseno Penangsang, and Adi Suprijanto, October 2014.
- Journal of Engineering & Applied Sciences;Sep2014, Vol. 9 Issue 9,

p1476, "Modified Direct-Zbr Method Pso Power Flow Development For Weakly Meshed Active Unbalanced Distribution Systems," Suyanto, Indri Suryawati, Ontoseno Penangsang, Adi Soeprijanto, Rony Seto Wibowo, **Uman Putra, D. F.**

- Journal of Electrical Systems" (JES), ISSN 1112-5209 Special Issue 3, "Power System Stabilizer Based on Interval Type 2 Fuzzy Sliding Mode Controller for Oscillation Damping on 500kV Java-Bali Electrical Power System",
- International Review of Automatic Control vol 9 no. (2), pp. 128-134, 2016. "Positive sequence based catastrophe theory voltage stability index to analyzed the voltage stability index in the unbalanced radial distribution systems", **P Uman, D Fajar**, O Penangsang, A Soeprijanto, H Miyauchi.
- International Review of Electrical Engineering Vol. 11, No. 4 Juli-Agustus pp. 428-434 2016. "Unbalanced Radial Distribution Systems Voltage Stability Index Using Extreme Learning Machine", **P Uman, D Fajar**, O Penangsang, A Soeprijanto, H Miyauchi.
- International Seminar on Intelligent Technology and Its Application, ISITIA 2016 , "Unit commitment with non-smooth generation cost function using binary particle swarm optimization", Wibowo, R.S., Utama, F.F., **Putra, D.F.U.**, Aryani, N.K.
- International Seminar on Intelligent Technology and Its Application, ISITIA 2016. "Optimal tuning of PSS parameters for damping improvement in SMIB model using random drift PSO and network reduction with losses concept .", Soeprijanto, A., **Putra, D.F.U.**, Fenno, O., Ashari, H.S.D., Rusilawati.
- International Review of Automatic Control (IREACO), VOL 10 no 2 pp 204-210, 2017., "Optimal tuning of PSS parameter using HACDE based on equivalent SMIB model." Rusilawati, Ashari, D., **Putra, D.F.U.**, Wibowo, R.S., Soeprijanto, A.

-

## THESIS and FINAL PROJECT

- **THESIS :**

“Under Frequency Load Shedding Based on Fuzzy Logic Controller Using Gradient Frequency Method for Java-Bali 500 kV”

**Supervisor :** 1. Prof Ir. Ontoseno Penangsang M.Sc, Ph.D  
2. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto MT.

- **FINAL PROJECT:**

“Contingency Analysis for South and West Sulawesi 150kV Electrical Systems”

**Supervisor :** 1. Prof Ir. Ontoseno Penangsang M.Sc, Ph.D  
2. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto MT.